ISSN 1157-4887

LES CAHIERS DE SCIENCE & VIE

GRANDS INGÉNIEURS

RUDOLF DIESEL

1858-1913

Comment il a inventé le moteur que plébiscitent les Français

T 2281 - 31 - 32,00 F-RD

VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

EN VENTE PARTOUT

Un ingénieur allemand nommé Rudolf Diesel

Son nom, associé à un moteur d'automobile, voire au carburant qu'on met dedans, s'écrit aujourd'hui sans majuscule et affublé d'un accent. La réussite d'une invention passe-t-elle donc par l'oubli de son inventeur ? S'agissant de Rudolf Diesel, un rapide sondage dans les stations-service permettrait sans doute de le penser.

Ce *Cahier*, le premier d'une collection consacrée aux « Grands Ingénieurs », a donc pour propos de restituer une majuscule, de lui adjoindre un prénom, des dates, des lieux, des événements, et de raconter l'histoire de l'invention d'un moteur. Il n'invite pas seulement à rectifier une injustice du temps, mais aussi à découvrir en quoi cette invention est presque unique en son genre.

Pour point de départ, elle a en effet une mystérieuse annotation d'étudiant dans la marge d'un cahier de cours : *« Voir s'il n'est pas possible de réaliser pratiquement l'isotherme »*. Le cours porte sur le moteur idéal de Carnot, une belle construction théorique dont nombre d'ingénieurs du XIXe siècle rêvent de se rapprocher. Un moteur théorique dans lequel le travail produit ne dépend que de la différence de température entre la source chaude et la source froide, et où la **totalité de la chaleur fournie** est convertie en travail au cours de deux phases : une phase de détente isotherme – le fluide se dilate à température constante – et une phase de détente adiabatique – le fluide poursuit sa dilatation tandis que sa température décroît jusqu'à celle de la source froide. « *Dès lors*, écrit Diesel, *le désir de réaliser le processus idéal de Carnot régla mon existence. Je quittai l'école, entrai dans la vie active, et avais à me faire une situation. Mais l'idée ne me quitta jamais.* »

La suite de l'histoire est la longue succession d'épreuves qui, d'une idée, à sa traduction dans les faits, puis à sa reconnaissance sociale, s'appelle sans doute une invention. En fait, un véritable parcours du combattant.

C'est que de tous côtés, cela résiste. Du côté, d'abord, de la théorie elle-même : trop idéale, elle impliquera d'abandonner l'idée même de réaliser l'isotherme… Du côté de la matière, ensuite, qui ne cesse de mettre des écarts à la théorie recalculée : car les métaux cassent, se dilatent, s'usent par le frottement… Du côté des hommes, enfin : ceux, d'une part, qu'il faut savoir convaincre pour qu'ils financent et auxquels on est contraint de s'associer ; ceux, d'autre part, dont il faut se protéger en déposant les brevets au plus tôt, au risque de s'exposer à des procès en plagiat, à mesure que la mise au point de l'invention impose de prendre des libertés avec les descriptions du brevet.

D'échecs en compromis successifs, naît ainsi, en 1897, le *moteur rationnel*. Le combustible, injecté dans une chambre enfermant un volume d'air porté à très haute pression, s'enflamme spontanément. Sous l'effet de cette brusque augmentation de chaleur, l'air se dilate et repousse le piston. Avec un rendement thermique de 30 %, c'est de loin le moteur le plus performant de l'époque. En théorie du moins. Car en pratique, mis trop tôt sur le marché, il souffre de défauts de jeunesse, ce qui ne fait l'affaire, ni de Diesel, ni de ses clients. Il reviendra aux ingénieurs de la M.A.N de le fiabiliser, chose faite dans les premières années de notre siècle.

Entre-temps, Diesel aura fait fortune. Mais pour quelques années seulement ; en effet, de dépenses somptuaires en mauvaises affaires, il sombrera peu à peu dans la ruine. Il disparaît en 1913.

Regardons une photographie prise peu avant sa mort. A moitié perdu dans la pénombre, un visage austère émerge d'un col cassé, ceint d'une cravate grise assortie à un habit noir. Une perle de cravate, de fins lorgnons sans monture, une moustache bien taillée : l'homme est soigné, riche et, on le sent, soucieux d'ordre. A le regarder plus longuement, on repère pourtant comme une inquiétude de cette trace qu'il va laisser… A quoi songe-t-il ? A un souvenir d'enfance ?…

Rouages épars sur le tapis, l'horloge familiale qu'il venait de démonter ne lui avait pas encore livré tous ses secrets, que son père était entré dans la pièce… La suite, cruelle, raconte une punition d'un autre âge… Est-ce pour cela que, parvenu au faîte de la renommée, cet enfant curieux de mécanisme, et que la vie avait rendu opiniâtre et ambitieux, était, au fond, resté si fragile… ?

J-PI

La rédaction remercie la *Compagnie Papin*, une association fondée par les frères Guillemard, qui possède, à Giverny, une belle collection de moteurs et machines à vapeur. Dans ce *Muséum de mécanique naturelle*, toutes les pièces exposées sont en état de marche et peuvent être animées avec leur énergie d'origine. Nul n'étant prophète en son pays, c'est en Angleterre ou en Hollande que la *Compagnie Papin* est le plus souvent invitée à exposer ses impressionnantes machines… Nos remerciements vont également à *New Sulzer Diesel France* pour avoir mis à notre disposition de précieux documents sur l'histoire de cette société, l'un des tout premiers constructeurs de moteurs Diesel.

RUDOLF DIESEL

Comment il a inventé le moteur que plébiscitent les Français

ÉDITO 1

ET AVANT

MOTEURS : COMMENT ET POURQUOI REMPLACER LA VAPEUR 6
PAR LYNWOOD BRYANT
PROFESSEUR ÉMÉRITE D'HISTOIRE, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, USA

UNE VIE

UNE VIE SOUS HAUTE PRESSION 18
PAR GÉRARD CHEVALIER ET FREDERIK REITZ

LES ACTEURS HUMAINS ET NON HUMAINS

DE SADI CARNOT À ALFRED KRUPP 30
PAR KONSTANTINOS CHATZIS
CHARGÉ DE RECHERCHE, LABORATOIRE « TECHNIQUES, TERRITOIRES ET SOCIÉTÉS », ÉCOLE NATIONALE DES PONTS- ET-CHAUSSÉES, NOISY-LE-GRAND

Ce moteur Diesel, construit en 1908 par la société Carels Frères, *est actuellement en cours de restauration, à Giverny. Il devrait recommencer à tourner cette année. Pesant quelque 28 tonnes, il deviendra ainsi le plus gros moteur d'exposition en état de marche.*

L. DE SÉVA - TAPABOR - COLL. GARAGE DE GIVERNY

L'AIR DU TEMPS 39
PAR EMMANUEL CHADEAU
PROFESSEUR D'HISTOIRE CONTEMPORAINE, UNIVERSITÉ LILLE III

L'HISTOIRE

TREIZE DÉCISIONS POUR UN NOUVEAU MOTEUR 46
PAR DONALD THOMAS
PROFESSEUR D'HISTOIRE, VIRGINIA MILITARY INSTITUTE, LEXINGTON, VA, USA

REVUE DE PRESSE 62
PAR VANINA PIALOT

VISION D'INGÉNIEUR

RUDOLF DIESEL, UTOPISTE SOCIAL 66
PAR GEORGES RIBEILL
DIRECTEUR DE RECHERCHE, ÉCOLE NATIONALE DES PONTS-ET-CHAUSSÉES, PARIS
ET MONA DE PRACONTAL

NAISSANCE D'UNE INDUSTRIE

CONFLUENCE SOUS LA MER 76
PAR PHILIPPE MASSON
DOCTEUR ÈS LETTRES, MEMBRE DE L'ACADÉMIE DE MARINE, PARIS

UNE LENTE MONTÉE EN PUISSANCE 82
PAR EMMANUEL CHADEAU

LES TEMPS MODERNES DU MOTEUR DIESEL 90
PAR LUC AUGIER

Photos de couverture : Musée du CNAM – Deutsches Museum München – The Science Museum : Science & Soc. P.L.

PRIX NORMAL D'ABONNEMENT AUX CAHIERS DE SCIENCE & VIE PANORAMA (1 AN) : 12 NUMEROS + 6 CAHIERS S & VIE : 413 FF
MAXI PANORAMA (1 AN) : 12 NUMEROS + 4 HORS SERIE + 6 CAHIERS S & VIE : 488 FF

CANADA et **U.S.A**, PERIODICA INC. CP 444OUTRE-MONT, Québec, CANADA H2V 4R6 ; **SUISSE**, NAVILLE Case Postale 1211, GENEVE 1- SUISSE ; EN **BELGIQUE,** PRESSE ABONNEMENT 90 BD DU SOUVERAIN 1170 BRUXELLES, TARIFS ET AUTRES PAYS NOUS CONSULTER.

PUBLIE PAR EXCELSIOR PUBLICATIONS S.A.
1, RUE DU COLONEL PIERRE AVIA 75503 PARIS. CEDEX 15 - TEL : 46.48.48.48
EXCELSIOR PUBLICATIONS S.A. CAPITAL SOCIAL : 11 100 000 F - DUREE 99 ANS
PRINCIPAUX ASSOCIES : YVELINE DUPUY, PAUL DUPUY.

DIRECTION ET ADMINISTRATION :
PRESIDENT-DIRECTEUR GENERAL : PAUL DUPUY, DIRECTEUR GENERAL : JEAN-PIERRE BEAUVALET, DIRECTEUR GENERAL ADJOINT : FRANCOIS FAHYS, DIRECTEUR FINANCIER : JACQUES BEHAR, DIRECTEUR COMMERCIAL PUBLICITE : GILLES BECDELIEVRE, DIRECTEUR MARKETING ET COMMERCIAL : MARIE-HELENE ARBUS, DIRECTEURS MARKETING ET COMMERCIAL ADJOINTS : JEAN- CHARLES GUERAULT ET PATRICK-ALEXANDRE SARRADEIL, DIRECTEUR DES ETUDES : ROGER GOLDBERGER, DIRECTEUR DE LA FABRICATION : PASCAL REMY.

COMITE DE REDACTION : PHILIPPE COUSIN, EMMANUEL CHADEAU, BRUNO LATOUR, ANTOINE PICON, MICHEL SERRES, ISABELLE STENGERS.

REDACTION : JEAN-PIERRE ICIKOVICS (REDACTEUR EN CHEF), GERARD CHEVALIER, ANNE LEFEVRE (REDACTEURS EN CHEF ADJOINTS), PATRICIA CHAIROPOULOS, VANINA PIALOT, ALICE ROLLAND (REDACTRICES), NAJAT NEHME (SECRETAIRE DE REDACTION), ALINE HOUILLON (SECRETAIRE), STEPHANIE DE MAREUIL (ICONOGRAPHE), DENIS MALARTRE (1er MAQUETTISTE), MICHEL SOUDAY (MAQUETTISTE), MONIQUE VOGT (SERVICE DES LECTEURS).

SERVICES COMMERCIAUX : RELATIONS EXTERIEURES : MICHELE HILLING ASSISTEE DE BLANDINE DEVRIENDT, ABONNEMENTS : PATRICK SARRADEIL, COMMANDES D'ANCIENS NUMEROS ET RELIURES : CHANTAL POIRIER TEL : 46.48.47.18, RELATIONS CLIENTELES ABONNES : PAR TELEPHONE (1) 46.48.47.08 OU 47.11, PAR COURRIER : SERVICE DES ABONNEMENTS : 1 RUE DU COLONEL PIERRE AVIA 75503 PARIS CEDEX 15, CHEF DE PRODUIT MARKETING : CAPUCINE JAHAN TEL. : 46.48.47.30 ; VENTE AU NUMERO : JEAN-CHARLES GUERAULT, ASSISTÉ DE CATHERINE LOUIS TEL : 46.48.47.40 ; REASSORTS ET MODIFICATIONS : TERMINAL E 91 TEL. VERT : 05.43.42.08 (RESERVE AUX DEPOSITAIRES DE PRESSE). PUBLICITE : VERONIQUE MOULIN EXCELSIOR-PUBLICITE, INTERDECO 27, 23, RUE DE BAUDIN - 92300 LEVALLOIS-PERRET TEL : 41.34.80.00

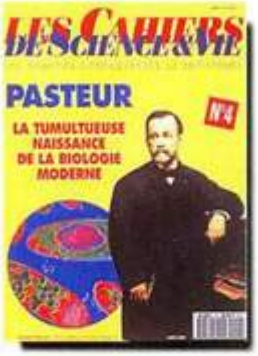
DIRECTEUR DE LA PUBLICATION : PAUL DUPUY - DÉPÔT LÉGAL : N° 84007 - N° DE COMMISSION PARITAIRE : 57284 DU 15 DECEMBRE 1975 PHOTOGRAVURE : FLASH IMAGE - IMPRESSION : IMPRIMERIE SEREGNI, MILAN - PRINTED IN ITALY

COLLECTIONNEZ LES ÉVÉNEMENTS MARQUANTS DE L'HISTOIRE DE LA SCIENCE

COLLECTION 1991

LES GRANDES CONTROVERSES SCIENTIFIQUES.

n° 1 Naissance de l'aviation
n° 2 Galilée
n° 3 La dérive des continents (épuisé)
n° 4 Pasteur
n° 5 Fresnel (épuisé)
n° 6 Darwin ou Lamarck



COLLECTION 1992

LES GRANDS PROJETS SCIENTIFIQUES DU XXEME SIECLE.

Cette collection vous entraine dans ce que l'on appelle outre-atlantique «big-science». Il s'agit de projets scientifiques d'envergure, le plus souvent orchestrés par des nations, mettant en scène des milliers d'acteurs et coûtant des milliards de francs.

n° 7 Le projet Manhattan

n° 8 Naissance de la radio-astronomie

n° 9 La Naissance du concorde

n° 10 L'invention de la pilule contraceptive

n° 11 De Spoutnik à Gagarine

n° 12 La physique géante

Elegante et pratique, chaque reliure est conçue pour classer 12 numéros des CAHIERS DE SCIENCE & VIE

BON DE COMMANDE

à compléter et à retourner avec votre règlement à l'ordre de CAHIERS DE SCIENCE & VIE sous enveloppe affranchie à : Service VPC- 1, rue du Colonel Pierre Avia 75503 Paris cedex 15

☐ **Je commande** les numéros suivants des CAHIERS de SCIENCE & VIE au prix unitaire de 32 francs

☐ 1 ☐ 2 ☐ 4 ☐ 6

☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐ 10 ☐ 11 ☐ 12

☐ **Je commande** la collection 1992 des CAHIERS de SCIENCE & VIE du n°7 au n°12 : 160 francs au lieu de 192 francs*

☐ **Je commande** ..... reliure(s) des CAHIERS de SCIENCE & VIE au prix unitaire de 65 francs -étranger 75 francs

• Le montant de ma commande est de ..... francs

Nom

Prénom

Adresse

Code postal Ville

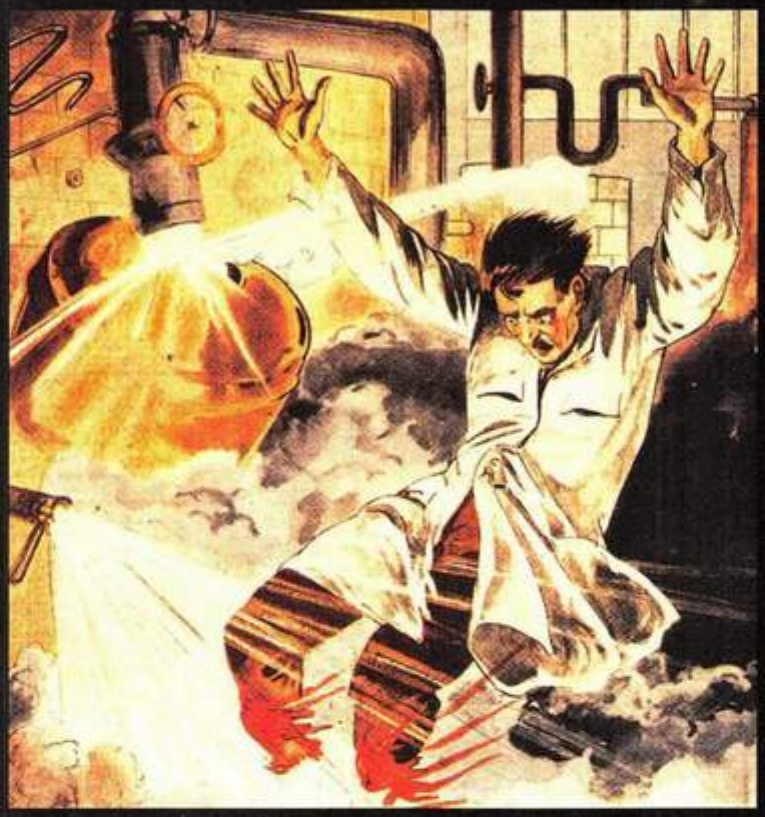
Offres valables jusqu'à fin 1996 et réservées à la France Métropolitaine
Etranger: nous consulter Tel (33-1) 46 48 47 08 ou 46 48 47 11

(*) Prix de vente normal chez votre marchand de journaux

En application de l'article L 27 de la loi du 6-01-1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande et sont exclusivement communiquées au destinataire du bulletin. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès d'Excelsior. Vous pouvez vous opposer à ce que vos nom et adresse soient communiqués ultérieurement.

RC Paris B 572 134 773
CSV

ET AVANT



Au long du XIXe siècle, ingénieurs et inventeurs ont étudié toutes les configurations possibles des éléments constitutifs des machines à vapeur pour en améliorer le rendement. Mais à partir de 1860, un nouveau plan d'organisation des moteurs thermiques commence à apparaître : le moteur à combustion interne.

ADPC - EXPLORER ARCHIVES

MOTEURS : COMMENT ET POU

RQUOI REMPLACER LA VAPEUR

Au XIXe siècle, où qu'on aille, on entend chuinter les locomotives et les bateaux que la machine à vapeur entraîne.

L. DE SELVA - TAPABOR

Après avoir fait triompher la machine à vapeur, le XIXe siècle ne songe qu'à la remplacer. Pour des raisons techniques et parce qu'il s'effraie de ses excès. Car adaptée à la grande industrie, elle détruit l'harmonie sociale en faisant disparaître l'entreprise artisanale. Que faudrait-il à cette dernière ? Un moteur de petite taille, fiable et économique pour faire tourner ses machines. Les idées ne manquent pas, ni les inventeurs.

PAR LYNWOOD BRYANT

Rudolf Diesel a vécu à l'ère de la vapeur. Obtenue pour l'essentiel par la combustion de charbon, elle produit une force motrice qui déplace un piston, d'avant en arrière, dans le cylindre d'une machine. La vapeur, à l'époque de Diesel, est **Le** symbole du progrès. Où qu'on aille, on entend souffler et chuinter les bateaux ou les locomotives qu'elle entraîne. Ces moyens de transport intriguent et fascinent par leur nouveauté.

La vapeur occupe aussi une place de choix dans la formation des ingénieurs mécaniciens et dans les pages de leurs revues techniques. En elle, se condensent les images, les concepts et les analogies qui orientent la créativité des inventeurs et des scientifiques. La question, pour les uns, est de concevoir des machines plus pratiques, pour les autres, de percer – ou du moins essayer de le faire – les mystères de la conversion d'énergie.

Si extraordinaire soit-elle, maints problèmes et limites subsistent en effet à propos de la puissance motrice de la vapeur. Ils suffisent d'ailleurs à construire le programme de mécanique appliquée pour le siècle à venir. Dans ce processus de conversion d'énergie, le moteur à vapeur, lui-même, n'est qu'un des éléments. Sa mise en œuvre nécessite une alimentation en combustible et en eau, une enceinte où brûler le combustible, enfin, un système d'évacuation de la fumée et des cendres. La chaleur produite passe dans une chaudière où l'eau, mise sous forme de vapeur, est maintenue sous pression avant d'aller agir sur le piston. Dans sa forme la plus simple, ce dernier se réduit à un cylindre haute pression. Mais, dès qu'on cherche à économiser le charbon, des éléments s'ajoutent : un ou plusieurs autres cylindres pour tirer profit d'une détente complète ; un condenseur pour récupérer en fin de cycle le reste de vapeur et le renvoyer sous forme d'eau dans la chaudière.

Le système comprend également différents instruments qui permettent de contrôler le niveau d'eau, la pression et le flux de vapeur. A l'époque de Diesel, un ingénieur mécanicien ne manque donc pas d'ouvrage. Maintenir la puissance disponible, régler les problèmes que cela pose, améliorer les performances et adapter la puissance à de nouvelles utilisations, il y a du grain à moudre.

Priorité des priorités : l'explosion

L. DE SELVA - TAPABOR - BIBLIOTHÈQUE DES ARTS DÉCORATIFS

Dans les débuts de la vapeur, l'explosion des chaudières est un risque majeur dont on ne maîtrise pas les causes.

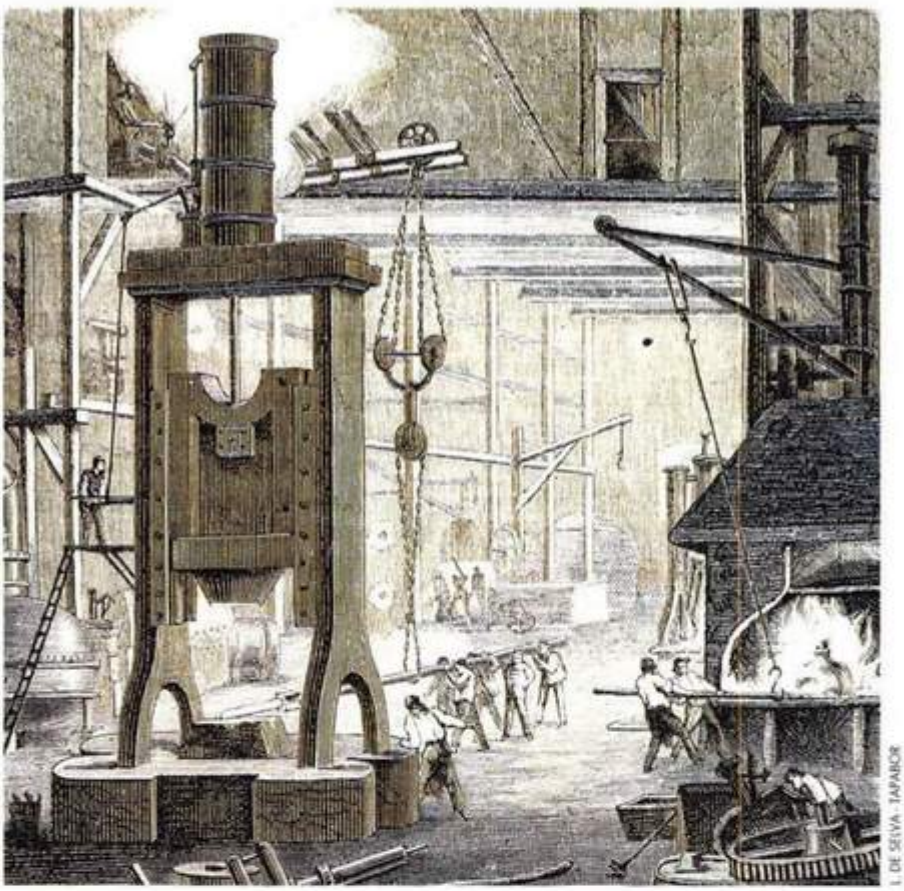
des chaudières. Dans les débuts de la vapeur, l'accident est très fréquent. Le mélange d'eau chaude et de vapeur sous pression dans une chaudière forme une importante concentration d'énergie qui peut se libérer sans prévenir. On ne maîtrise pas encore très bien les causes de ces explosions soudaines et effrayantes, qui peuvent non seulement détruire un navire ou une usine, mais aussi entraîner de nombreux morts et blessés. Un tel accident dévoile de façon spectaculaire les conséquences imprévues d'une technique nouvelle dans le domaine de la santé publique. C'est pour parer à ce danger majeur du XIXe siècle – l'explosion de chaudière –, qu'on voit pour la première fois apparaître les politiques et les institutions spécialisées dans la gestion du risque technologique que nous connaissons aujourd'hui. Faut-il s'étonner que, dans ces conditions, les inventeurs de l'époque s'intéressent de près à l'idée d'une machine thermique sans chaudière ?

Les machines à vapeur connaissent par ailleurs un autre problème endémique : leur faible rendement. Dans les installations industrielles qui font appel à cette énergie, la question fait l'objet d'études scientifiques approfondies. Toutes démontrent que, sur l'énergie totale contenue dans le combustible, seule une très faible quantité est transformée en travail effectif sur l'arbre. A peine 1 à 2 % pour une machine ordinaire jusqu'à, peut-être, 6 ou 8 % pour des machines plus perfectionnées et bien entretenues. Cela tient d'abord à la déperdition de chaleur : entre le foyer, la chaudière, le moteur et le condenseur, la chaleur a maintes occasions de s'échapper sans fournir le moindre travail. Mais cela tient aussi à une raison plus fondamentale : dans une machine thermique, fût-elle la plus parfaite, une grande partie de l'énergie fournie ne peut pas être convertie en travail parce que sa température est trop basse. Dans son ouvrage *Réflexions sur la puissance motrice du feu* (1824), premier classique de thermodynamique, Sadi Carnot y fait référence. Selon lui, l'énergie thermique ne peut être transformée en travail que lorsqu'elle passe d'une température élevée à une température basse. Cette chute de température détermine la quantité de travail produite, exactement comme une chute d'eau conditionne le travail effectué par une roue hydraulique. En effet, l'énergie potentielle de l'eau qui s'écoule sous la roue n'est pas une énergie utile. Elle n'entre pas dans le travail fourni par la roue. De la même façon, la machine à vapeur ne peut utiliser l'énergie thermique existant à une température plus basse que la température ambiante.

Dans la foulée de Carnot, tout le monde va s'accorder pour définir le rendement thermique d'une machine comme la différence entre les températures maximale et minimale du fluide actif, divisée par la température maximale. Toutes ces températures sont exprimées en degrés au-dessus du zéro absolu. Dans cette formule, le terme au dénominateur est donc par définition élevé et, s'agissant de la vapeur, le résultat, nous l'avons vu, fait apparaître des valeurs extrêmement faibles pour ce type de rendement. Au milieu du siècle, les professeurs des écoles techniques enseignent ainsi à leurs étudiants qu'il est illusoire, avec cette forme d'énergie, d'espérer dépasser des rendements supérieurs à 10 %. Que peut en conclure un étudiant ambitieux ? Qu'un meilleur moyen de tirer du travail d'une machine thermique doit bien exister...

Dans le dernier paragraphe de son livre, Carnot met pourtant en garde ses lecteurs. Ce rendement n'est pas, et de loin, le seul critère à considérer pour juger de la valeur des moteurs. Mais ses idées ne sont pas bien comprises par la génération suivante et le concept de rendement thermique reste dominant. Sa faiblesse, désormais notoire, ne peut qu'inciter les inventeurs à rechercher des alternatives à la vapeur.

Troisième problème, cette énergie est mal adaptée aux installations de petite taille car elle est trop coûteuse. Elle est intéressante quand il s'agit de faire fonctionner en continu des



L. DE SELVA - TAPABOR

La machine à vapeur fait tourner les grandes usines mais s'adapte mal aux petits ateliers traditionnels. Pour ces derniers, Charles Babbage préconise la recherche d'une autre source d'énergie.

SCIENCE & SOCIETY P. L. THE SCIENCE MUSEUM, LONDON

Charles Babbage

COLL. SOAZIG - EXPLORER

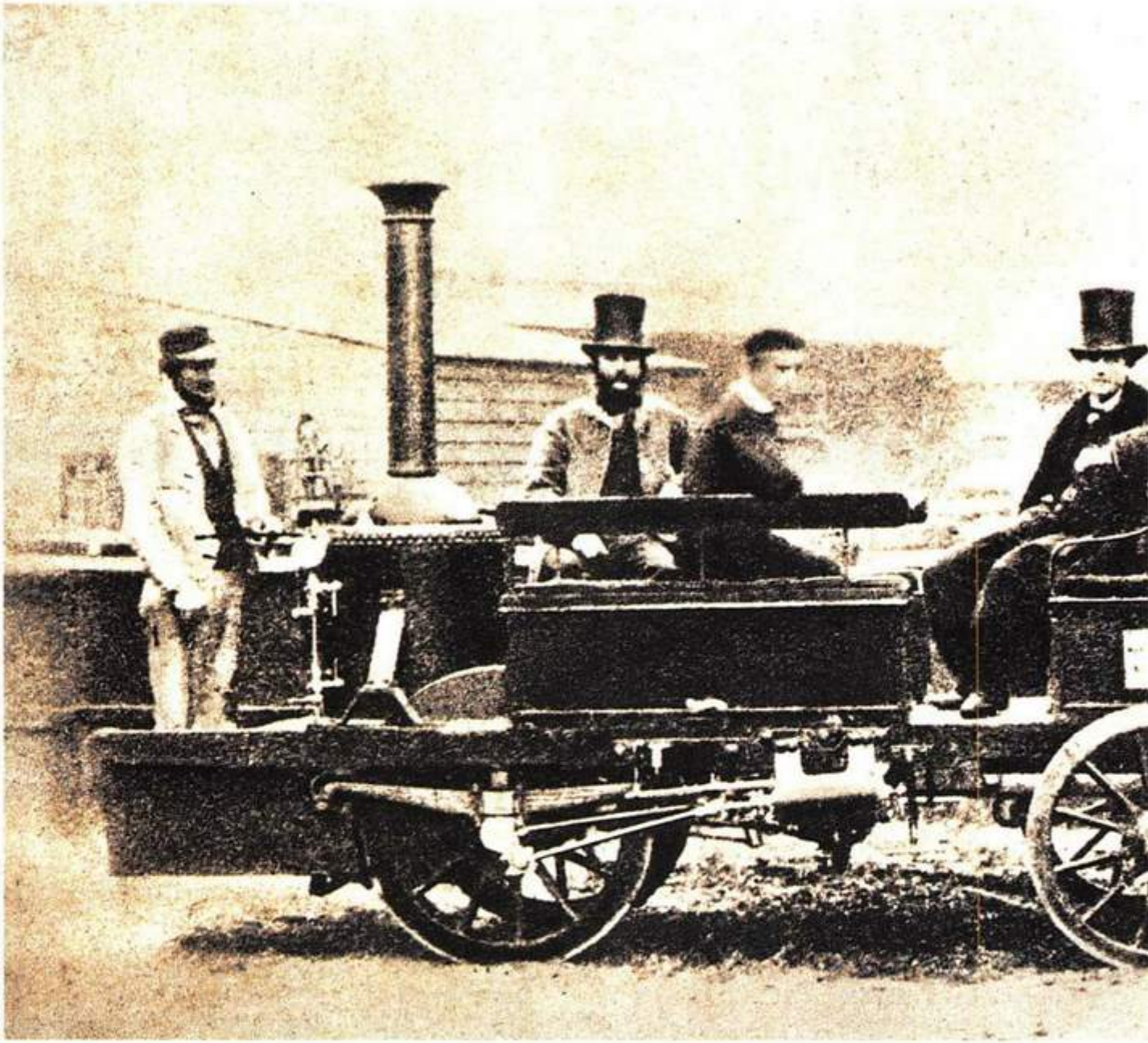
bateaux ou de grandes usines. En revanche, elle revient cher dans le cadre de faibles charges ou d'un fonctionnement intermittent. Car, outre que le rendement d'une petite machine à vapeur est toujours inférieur à celui d'une grande, les coûts d'exploitation, eux, restent quasiment identiques. Quelle que soit la taille de l'installation, il faut en effet une licence, une assurance, et habituellement, un ouvrier à plein temps. Du temps de Diesel, une installation industrielle d'une puissance de 5 chevaux-vapeur coûte ainsi environ trois fois plus cher le cheval-heure qu'une installation industrielle d'une puissance de 20 chevaux-vapeur. Cette différence avantage donc la grande industrie au détriment des petits ateliers traditionnels, et tous ceux qui se sentent concernés par les changements dans le mode de vie qui résultent de la révolution industrielle s'en inquiètent. Des ingénieurs qui s'intéressent aux questions philosophiques, tels Charles Babbage et Franz

Dans les années 1880, l'électricité, nouvelle forme d'énergie, trouve son application surtout dans l'éclairage. (Inauguration de l'électricité aux Halles centrales par le ministre Yves Guyot).

Reuleaux, n'oublient pas de relever ce penchant de la vapeur en faveur de la grande industrie. Ils en appellent à la conception d'un système de production d'énergie primaire capable de faire tourner les machines des entreprises familiales avec les mêmes bienfaits que la vapeur offre aux grands capitalistes.

Une approche intéressante de ce problème serait d'utiliser la vapeur là où elle est le plus efficace. Elle pourrait produire de l'énergie, à grande échelle, dans une station centrale. Reste ensuite à trouver un moyen de la distribuer à un ensemble de petits utilisateurs locaux ou, mieux encore, à une ville entière. Plusieurs systèmes sont testés. L'un d'eux utilise comme vecteur de l'air comprimé. Il est introduit à Paris dans les années 1880, alors que Diesel y travaille. A la même époque, un autre système, dans lequel l'énergie est distribuée sous forme de courant électrique, voit le jour. Mais son avenir ne semble guère prometteur. Outre le réseau de distribution, il nécessite en effet deux étages de conversion : de l'énergie primaire à l'électricité et de cette dernière à la mise en œuvre de la machine. Dans les deux premières décennies de son utilisation, le courant électrique qui sert surtout à l'éclairage, est peu employé pour fournir de la puissance motrice. D'autres systèmes, faisant appel à de l'eau sous haute pression, fonctionnent longtemps dans des villes anglaises. Mais, même si ces systèmes sont nombreux et variés, la préférence du petit entrepreneur continue d'aller à une source autonome d'énergie primaire.

Pour répondre aux besoins de petites puissances, les fabricants de machines à vapeur offrent ainsi des unités compactes qui combinent un foyer, une chaudière et une machine.



L. DE SELVA - TAPABOR

Des versions compactes de la machine à vapeur équipent les premières automobiles. (Voiture à vapeur de Yarrow et Hidditch à l'Exposition de Londres, 1862).

Elles fonctionnent relativement bien, mais ne permettent d'éviter ni les surcoûts en énergie, ni les risques associés à l'utilisation en locaux fermés. Toutes sortes de nouveaux modèles, techniquement avancés, sont mis sur le marché. La presse spécialisée en fournit une description détaillée. Les expositions internationales les font voir.

D'une manière générale, ces inventions sont le fait d'ingénieurs appliqués qui font davantage appel au bon sens qu'aux théories universitaires. Cette différence d'approche ne les empêche toutefois pas d'être au cœur des multiples débats qui animent les réunions d'ingénieurs professionnels, pas plus qu'elle ne freine leur esprit inventif. Un exemple : les machines à piston rotatif qu'ils font breveter dans plusieurs pays pendant des années. A leur origine, on ne trouve, semble-t-il, qu'une simple intuition : un mouvement alternatif s'apparente, par nature, à du gaspillage. A chaque cycle, il doit s'arrêter et démarrer deux fois. Un mouvement rotatif, parce qu'il est plus uniforme, devrait donc être plus efficace. Développée en même temps que le moteur diesel, la turbine à vapeur, qui repose sur une thermodynamique compliquée, constitue une version différente du moteur rotatif. Elle va connaître un succès retentissant dans la production en grande quantité d'énergie primaire. Le piston rotatif tombera, lui, en désuétude.

Une autre voie de recherche expérimentale repose sur le concept de chaleur latente. On sait, depuis Watt, que lorsqu'un liquide se transforme en gaz, une partie de l'énergie thermique est absorbée sans élévation de la température. Tout changement de phase de

cette nature se paie donc d'un certain prix – l'investissement en chaleur latente comme on l'appelle – mais ce prix est plus élevé pour l'eau que pour d'autres fluides. Ce coût de production inévitable pourrait-il être réduit en utilisant un fluide différent ? Une solution, par exemple, consisterait à ajouter de l'alcool à l'eau de la chaudière, une autre, à remplacer l'eau elle-même par de l'éther, de l'ammoniac ou de la vapeur de mercure. Une des premières applications pratiques de cette idée est apparue dans les années 1850 avec le moteur binaire à éther de Du Trembley. Il avait été installé sur huit navires effectuant le commerce en Méditerranée. Dans ce système, l'énergie primaire est fournie par une machine à vapeur ordinaire, et la chaleur dégagée lors de l'échappement est récupérée pour vaporiser de l'éther qui actionne un moteur spécifique. Ce dernier, estime-t-on à l'époque, contribue pour un quart à la puissance du bateau.

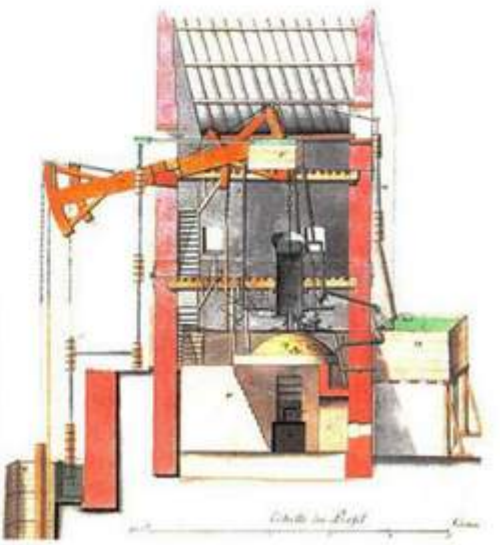
Dans le même ordre d'idées, les intéressantes propriétés de l'ammoniac en font un autre candidat crédible au remplacement de l'eau. C'est un gaz que Rudolf Diesel connaît bien. Dans les années 1880, à Paris, outre qu'il travaille sur des appareils de réfrigération, il consacre en effet son temps libre au développement d'un moteur à ammoniac.

Quantité d'expériences semblables sont menées au cours du XIXe siècle, et après. La plupart d'entre elles cherchent à réaliser des économies d'énergie en tirant profit des différences de chaleur latente. Et ce, bien que le principe de Carnot établisse que la part d'énergie thermique récupérable en travail ne dépende que de l'écart de température, et non de la nature du fluide utilisé.

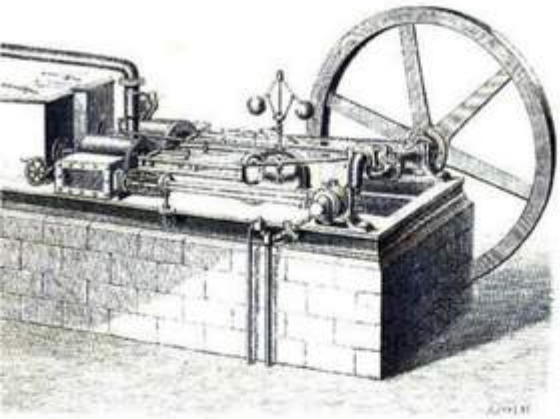
En fait, dans un moteur thermique, le seul vrai substitut à la vapeur est l'air. Avec lui, la question de la chaleur latente ne se pose plus, puisqu'il n'y a pas à le faire changer d'état. Les premiers moteurs à air chaud, parfois appelés moteurs caloriques, sont apparus tôt dans le siècle. Vers les années 1860, ils sont d'un usage courant. Dans les versions les plus simples, un volume d'air ordinaire,

La transformation de l'eau en vapeur est plus coûteuse en énergie que pour d'autres fluides (à droite, machine à feu pour épuiser les eaux d'une houillère). Les inventeurs se fondent sur cette idée pour rechercher des substituts à l'eau. Les machines à ammoniac voient le jour (à gauche, réfrigérateur à compression de Karl Linde, 1876).

DEUTSCHES MUSEUM MÜNCHEN



J.L. CHARMET - ARCHIVES NATIONALES



L. DE SELVA - TAPABOR

Vers les années 1860, les moteurs à air chaud de faible puissance sont d'un usage courant dans les petites installations. Plus silencieux, ils sont aussi plus sûrs, puisque dépourvus de chaudière.

enfermé dans un cylindre, est chauffé en continu, par un foyer extérieur. Il se dilate et active un piston. Cette machine, comparée à une machine à vapeur d'égale puissance, est nécessairement beaucoup plus volumineuse (car la vapeur véhicule bien mieux l'énergie que l'air). De surcroît, sa mécanique se trouve compliquée par la présence d'un piston supplémentaire qui sert à déplacer les volumes d'air entre les régions chaudes et froides du cylindre. Cependant, il n'y a pas de chaudière, ce qui évite tout risque d'explosion, et l'on peut brûler n'importe quel combustible. Silencieuse, la machine peut être utilisée en local fermé. Avantage supplémentaire, elle ne requiert aucune compétence ou licence particulières. A une exception près que nous aborderons un peu plus loin, ces moteurs sont de petite taille, la plupart d'une puissance d'un demi cheval-vapeur. Certains, plus imposants, atteignent un ou deux chevaux-vapeur. Ces moteurs sont très prisés dans les utilisations simples – comme pour pomper l'eau d'un puits privé – donc partout où le caractère pratique l'emporte sur la rentabilité.

Venons-en à notre exception. Il s'agit d'une énorme machine à air chaud, construite à New York en 1852 par John Ericsson. Elle est destinée à un navire de commerce transatlantique. Beaucoup plus imposante que n'importe quelle machine à vapeur, elle comprend quatre cylindres d'environ 4,3 mètres de diamètre. Sa conception en fait, en principe, une machine particulièrement économique. Elle est en effet équipée d'un échangeur qui récupère le surplus de chaleur à l'échappement et le renvoie à l'admission. On s'attend à une importante économie d'énergie : entre le tiers et le dixième de la consommation totale habituelle des machines à vapeur.

Cette machine fut un échec retentissant, mais elle demeure remarquable au plan historique. Elle apparaît, en effet, en même temps que des idées nouvelles sur l'énergie thermique. Celles-ci sèment la confusion dans la communauté des ingénieurs. A cette époque, certains, comme John Ericsson, croient encore que la chaleur circule dans une machine à vapeur comme l'eau à travers une roue hydraulique. Son travail effectué, elle ressortirait, quasiment inchangée et prête à produire un nouveau travail. Une telle erreur peut se comprendre [1]. La part d'énergie thermique convertie en travail est à l'époque si faible qu'elle peut passer inaperçue. En 1853, on discute longuement de la machine d'Ericsson dans les rencontres de professionnels et les journaux techniques. Nombre d'ingénieurs s'initient à la science nouvelle de la thermodynamique dans le cadre de ces débats.

Dans la plupart de ces moteurs à air chaud, la source de chaleur est externe : on brûle du combustible dans un foyer extérieur au moteur lui-même. Mais la combustion interne constitue, elle aussi, une possibilité intéressante. En fait, comme Carnot l'a remarqué, en 1824, l'air, en tant que fluide actif, présente un avantage unique : il contient

1 – Les travaux de James Joule sur l'équivalent mécanique de la chaleur (cf le numéro 29 des *Cahiers de Science et Vie*) ne sont publiés, en Angleterre, qu'à la fin des années 1840.

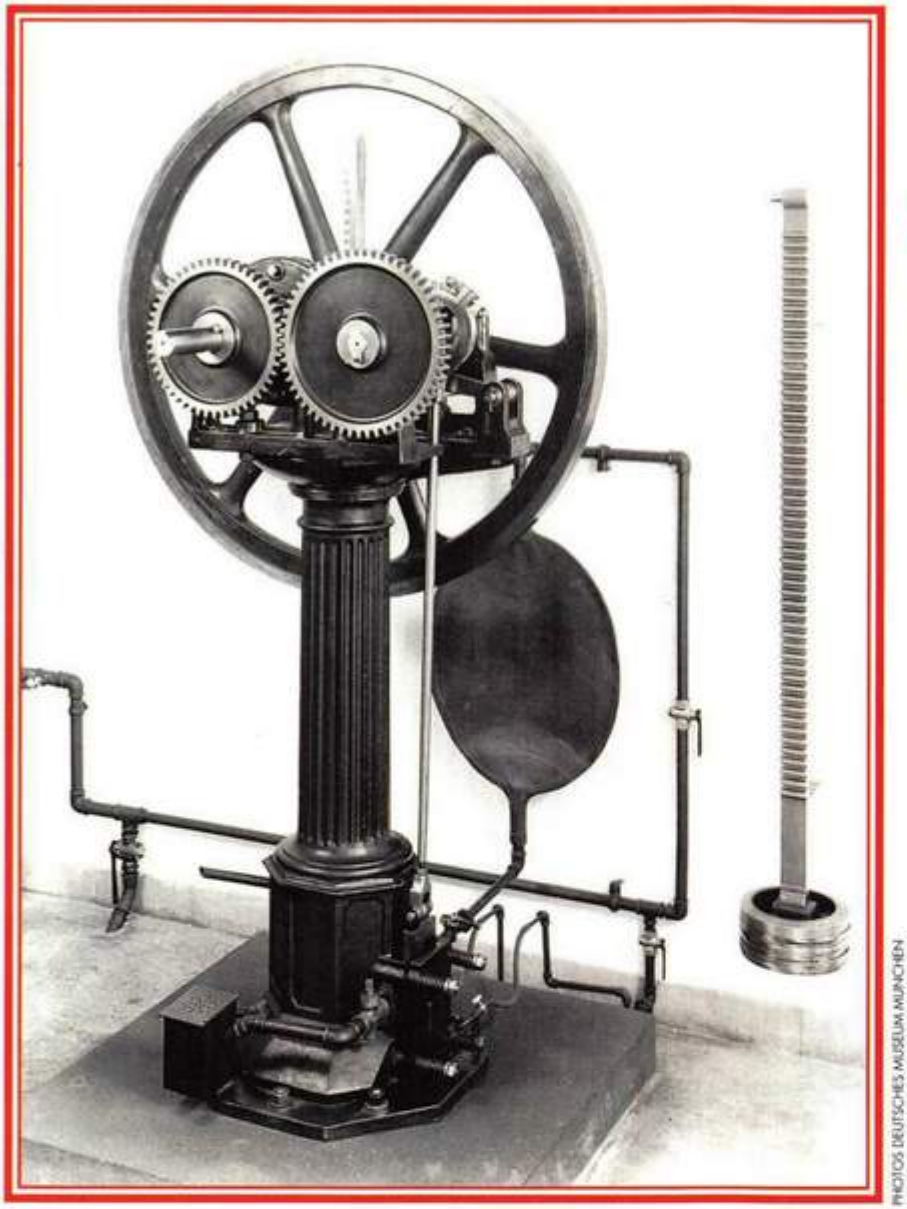
L. DE SELVA - TAPABOR

de l'oxygène. Il s'ensuit qu'il peut *de facto* participer à la combustion elle-même. La combustion interne a déjà été expérimentée en quelques occasions. Mais les combustibles de l'époque, bois ou charbon, laissent, dans le cylindre, des cendres incompatibles avec le déplacement du piston.

Tôt dans le siècle, on avait décou-

Etienne Lenoir a l'idée de brûler du gaz dans le cylindre d'un moteur à vapeur qu'il adapte à cet effet. Le vrai moteur à combustion interne est né.

SCIENCE & SOCIETY P. L. - THE SCIENCE MUSEUM, LONDON



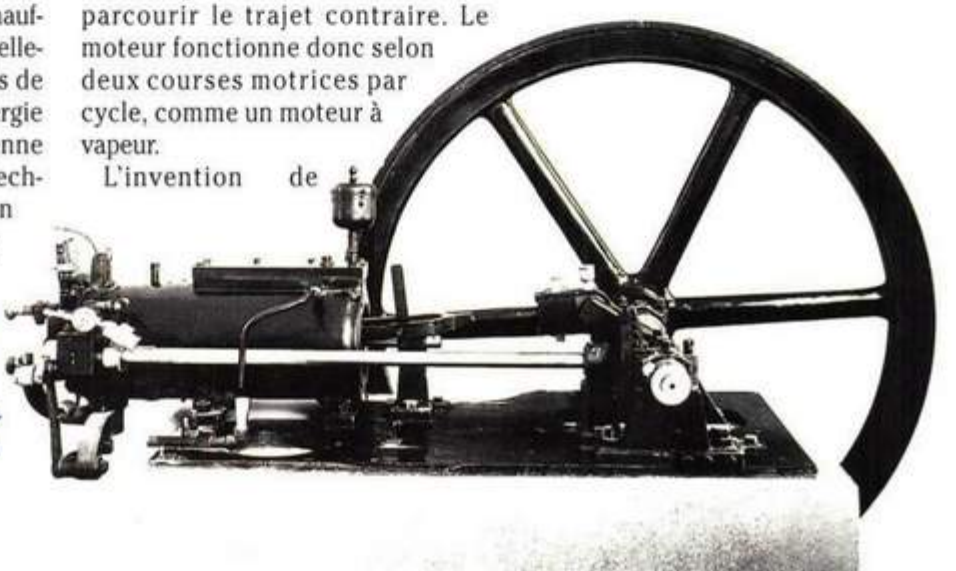
PHOTOS DEUTSCHES MUSEUM MÜNCHEN

Plus économe que la machine de Lenoir, le moteur à gaz d'Otto et Langen (1867) rappelle les machines à vapeur de Newcomen et Watt. Dans un cylindre vertical, le piston, après condensation de la vapeur, retombe sous l'effet de la pression atmosphérique.

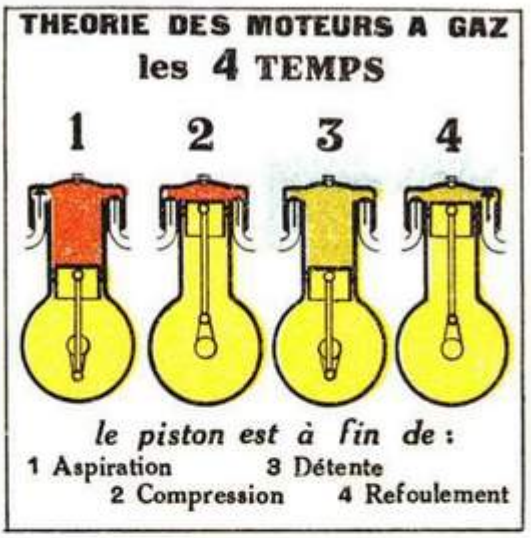
vert un nouveau combustible, le gaz d'éclairage, dont la combustion ne laissait pas de cendres. Produit à partir de charbon dans des usines centrales, on l'achemine en ville par un réseau de canalisations. Il n'a à l'origine que deux usages, l'éclairage des villes et le chauffage, quand l'idée vient tout naturellement à une douzaine d'inventeurs de l'envisager pour produire de l'énergie mécanique. En 1860, à Paris, Etienne Lenoir, amateur sans formation technique, adapte le cylindre d'un moteur à vapeur afin de pouvoir y faire brûler du gaz. Un mélange d'air et de gaz, mis à feu par une étincelle à mi-course du piston, se détend et repousse le piston. Lorsque celui-ci parvient en bout de course, un dispositif identique sur son autre face lui fait parcourir le trajet contraire. Le moteur fonctionne donc selon deux courses motrices par cycle, comme un moteur à vapeur.

L'invention de Lenoir est longuement discutée. Intéressé, un autre inventeur-amateur de Cologne, Nicolaus Otto, bricole à son tour des moteurs à gaz. Mais il rencontre de grandes difficultés à maîtriser les explosions à l'intérieur du cylindre et se tourne vers un moteur de type atmosphérique. Dans un tel concept, qui rappelle les premières machines à vapeur de Newcomen et Watt [2], la vapeur pousse le piston dans un cylindre vertical, puis est condensée pour générer une dépression. Le piston redescend alors sous l'effet de la pression atmosphérique. C'est ainsi que le moteur à gaz d'Otto et Langen voit le jour. Il a deux défauts : il n'est pas très élégant et fait beaucoup de bruit. Cependant, quand le jury de l'Exposition de Paris de 1867 évalue ses performances, il relève qu'il est économe : il fonctionne avec moitié moins de combustible que le moteur de Lenoir et n'a pas besoin d'autant d'eau pour être refroidi. Ce moteur, la première machine à combustion interne à connaître un réel succès,

2 – Voir article p. 6 des *Cahiers de Science et Vie* n°20 sur Carnot



En 1876, le nouveau moteur à gaz d'Otto est plus puissant. Son cylindre horizontal abrite un système qui fera le succès de la combustion interne : le cycle à quatre temps.



L. DE SELVA - TAPABOR

S'il réduit la fréquence des courses motrices, le cycle à quatre temps est le premier à combiner compression et combustion à l'intérieur du cylindre.

domine le marché pendant une dizaine d'années.

Il est toutefois limité en puissance. L'intervention de la pression atmosphérique dans le cycle ne permet pas de dépasser quelque trois chevaux-vapeur. Pour gagner en puissance, Otto reprend en 1876 le principe du cylindre horizontal, qui avait été celui de ses premières expériences de moteur à gaz. Pour contrôler la violence des explosions, il tente d'abord de faire varier la proportion d'air et de gaz du mélange, puis utilise toute la course motrice du piston pour comprimer le mélange avant sa mise à feu. Le résultat est probant : un moteur à la fois étonnamment silencieux et puissant. Otto vient en fait de découvrir le secret du succès de la combustion interne : le cycle à quatre temps. Décomposons-le. Premier temps : admission d'une pleine charge de mélange combustible-air ; deuxième temps : compression du mélange ; une mise à feu quasi instantanée précède le troisième temps : les gaz se détendent en repoussant le piston le long de sa course motrice ; quatrième temps : les gaz d'échappement sont évacués du cylindre [3]. A première vue, ce cycle ne paraît pas très intéressant. Il réduit en effet la fréquence des courses motrices. De deux par rotation, pour un moteur à vapeur ordinaire, elle passe à une toutes les deux rotations. Mais il est le seul à autoriser une compression et une combustion dans un cylindre dont le volume est balayé par un piston mobile. Autre avantage, ce moteur supporte des températures élevées, ce qui place son rendement thermique bien au-dessus de celui du moteur à vapeur. La combustion très rapide – quelques millièmes de seconde – laisse un temps court, mais suffisant, pour évacuer la chaleur avant une nouvelle combustion. Les matériaux d'alors pouvaient tolérer ces niveaux de température de façon intermittente, mais pas de façon continue.

Ces premières machines brûlent du gaz de ville. Elles dépendent ainsi du système, très rigide, de distribution de combustible. Pour qu'elles puissent fonctionner partout, il fallait donc les libérer de cette contrainte : en d'autres termes, utiliser un combustible liquide. Mais lequel ? Quelques pionniers, dès les années 1860, ont déjà testé l'alcool et les huiles de pétrole (pétrole lampant), nouvelles à l'époque. Ils ont constaté que la qualité du combustible affecte le fonctionnement du moteur, et ont déterminé, après d'innombrables séances d'essais et d'erreurs, la part de pétrole qui convient à chaque type de moteur.

Pour dangereuse qu'elle semble à première vue, l'essence va, dans le cas des moteurs rapides d'Otto, se révéler idéale. Ces moteurs vont être suffisamment allégés pour pouvoir être montés sur des voitures dans les années 1880, et même sur un avion en 1903. Le pétrole fournit un combustible extrêmement pratique et si énergétique qu'une automobile ou un tracteur peuvent facilement en emporter la quantité nécessaire à une journée de travail. Sous l'effet de cette heureuse combinaison de la combustion interne, du cycle à quatre temps et de l'essence de pétrole, les moteurs d'Otto vont inonder le marché. Ils servent à toutes sortes d'usages. Une étude anglaise de 1897 répertorie environ 400 moteurs différents de ce type.

A l'examen, la technique de la vapeur paraissait facile au regard des problèmes spécifiques de la combustion interne. Cette dernière est nécessairement discontinue. Elle implique une succession périodique d'explosions courtes : une ou deux par seconde dans un moteur qui tourne lentement, cinquante par seconde dans un moteur qui tourne vite. Le carburant liquide doit être vaporisé et mélangé à l'air dans les bonnes proportions au moyen d'un carburateur. La charge doit être enflammée au bon moment. Enfin, le surplus de chaleur doit être évacué par un quelconque système de refroidissement.

Quand Diesel entreprend de réaliser le moteur idéal de Carnot, tous ces problèmes, ignorés dans la technologie de la vapeur, sont relativement bien compris, sinon complètement résolus. Lorsqu'il installe sa station d'essais (au milieu d'une grande usine de construction de moteurs à vapeur), lui et son équipe peuvent s'appuyer sur une bonne expérience des combustions externe et interne. ■

3 – Le cycle à deux temps est une variante de ce même processus. Ici, l'admission et la compression s'effectuent dans le premier temps, la détente et l'échappement dans le second. Le poids de la machine s'en trouve allégé, mais il exige une consommation de combustible plus importante. L'idée du cycle à quatre temps d'Otto est mentionnée dans un obscur ouvrage d'Alphonse Beau de Rochas, publié en 1862. On y trouve d'intéressantes suggestions d'application aux canaux, aux chemins de fer et aux moteurs. En particulier, l'idée d'un moteur dont le piston serait sur une face mû par la vapeur, et sur l'autre, par du gaz et selon un cycle à quatre temps.

UNE VIE

Une éducation rigoureuse à Paris. Une fuite à Londres. De brillantes études à Munich. Un retour à Paris comme directeur de société. L'Allemagne à nouveau, où, en 1889, il s'installe. Vient la période de l'invention, puis celle de l'argent : richesse et ruine. Quelles forces motrices derrière cette vie ?

DEUTSCHES MUSEUM MUNCHEN

Rudolf Diesel travaille avec acharnement et ses résultats universitaires sont à la mesure de son ambition. Mais la « pression » intellectuelle qu'il s'impose s'accompagne de migraines et insomnies à répétition... Plus tard, son invention exige de comprimer très fortement l'air dans le cylindre. Comment résister à ces pressions, comment empêcher les fuites, les ruptures ? Le moteur y parviendra plus facilement que son inventeur.

PAR GÉRARD CHEVALIER ET FREDERIK REITZ

UNE VIE SOUS H

Au matin du 30 septembre 1913, le steamer Dresden, parti la veille d'Anvers, arrive, après une traversée calme et sans histoire, dans le port britannique de Harwich. Les passagers descendent la passerelle. L'un d'entre eux manque à l'appel. Ses compagnons de voyage, l'industriel belge Georges Carels et l'ingénieur en chef de Carels-Frères, partent à sa recherche. Mais il faut bientôt se rendre à l'évidence : Rudolf Diesel, le célèbre inventeur, a disparu. Carels, le dernier à l'avoir vu, se porte témoin. Le 29 au soir, Diesel semblait plutôt de bonne humeur, parlant avec enthousiasme de l'avenir de son moteur. Chacun avait regagné sa cabine vers 22h...

Quelques jours plus tard, un navigateur hollandais repêche en mer des effets personnels auprès d'un corps que, selon les lois en vigueur, il laisse à l'eau. Eugen, le second fils de Rudolf Diesel, reconnaîtra les affaires de son père. Comment comprendre cette fin tragique autrement que par un suicide ? Eugen lui-même le pensait.

Quelques indices l'y poussaient. Peu de jours avant sa disparition, Rudolf Diesel aurait déclaré : « *Après ma mort, il faudra me chercher.* » Ses lectures récentes de Schopenhauer, dont on sait le pessimisme, avaient intrigué ses proches. Plus fréquemment qu'à l'habitude, il se plaignait de sa santé. La veille de son départ, il avait ainsi écrit à son fils aîné, également prénommé Rudolf : « *Voilà un moment que les événements ne se déroulent pas comme je le souhaiterais. Mon cœur me cause des problèmes. Il me semble souvent qu'il s'est presque arrêté. Je ressens aussi des douleurs fulgurantes dans la tête, et mon état général est médiocre.* » Le 27 septembre, il avait adressé une lettre similaire à sa femme, mais il s'était étrangement trompé d'adresse en écrivant l'enveloppe. Martha n'a reçu ces lignes qu'après la disparition de son mari. Peu après, elle découvrira avec stupeur l'état calamiteux des finances de Rudolf. Il ne lui en avait jamais touché le moindre mot...

Le 15 septembre, alors que sa femme se trouvait à Francfort, Diesel avait congédié les domestiques. Il avait passé la soirée, seul, dans cette somptueuse demeure munichoise qu'il se prenait parfois à qualifier de mausolée. En rentrant, Wilhelm, le maître d'hôtel, avait trouvé toutes les pièces enfumées. Le maître des lieux venait de brûler un grand nombre de documents personnels, probablement en majorité des pièces financières [1]. Peu de temps auparavant, il avait fait don au *Deutsches Museum*

1 – De fait, les historiens éprouvent beaucoup de difficultés à reconstituer l'état exact des finances de Diesel au moment de sa mort.

AUTE PRESSION

HISTORISCHES ARCHIV M.A.N. AG AUGSBURG

de l'essentiel des actes relatifs à l'histoire de son moteur [2].

Cela signifie-t-il que Diesel a programmé son suicide ? Ou a-t-il agi sous le coup d'une impulsion ? Il n'a laissé aucun écrit qui permette de répondre à ces questions. Son fils Eugen voyait en son père la lutte permanente de deux tendances intérieures, l'ambition et l'abattement : « *C'était toujours pareil !* » écrit-il ; « *Il se trouvait toujours en tension entre la fière conscience de soi et la mélancolie, le sentiment d'un être perdu, d'un raté. Il s'employa en permanence à*

2 – Le Deutsches Museum fut fondé en 1903 par Oskar von Miller (1855-1934), camarade d'études et ami de Rudolf Diesel.

cacher le côté faible de sa personnalité pour n'arborer que les couleurs de la fierté. » Pendant la nuit du 29 au 30 septembre, l'abattement aurait donc eu le dernier mot sur l'ambition…

Est-ce un hasard si Diesel a laissé son corps s'engloutir dans les eaux qui séparent le continent de la Grande-Bretagne ? Car le franchissement de ce bras de mer marqua plus d'une fois son destin. Son origine même y est liée… Cinquante-huit ans plus tôt, deux jeunes Allemands, émigrés en France, prenaient en effet le bateau pour l'Angleterre. Ils voulaient se marier et, semble-t-il, les démarches étaient plus faciles à Londres qu'à Paris. C'étaient ses parents… En 1870, le voyage fut moins joyeux. Toute la famille avait dû quitter précipitamment la France pour prendre le chemin de l'exil anglais… Vingt-sept ans passèrent et, en 1897, une nouvelle traversée eut cette fois le parfum du triomphe. Rudolf avait alors effectué un fructueux voyage d'affaires à Glasgow, patrie de l'inventeur de la machine à vapeur. Ses interlocuteurs n'avaient pas eu trop de mal à le convaincre que son invention ferait de lui le James Watt du siècle prochain… Une année plus tard, il était de nouveau à Londres. Avec le succès technique, se profilait la richesse. De la capitale britannique, il avait écrit à son épouse : « *Ma chère femme, ne devenons pas des êtres d'argent même si nous devenons riches, restons humains, c'est mon vœu le plus fort au milieu de ces incessantes activités* ». A l'automne 1913, c'est pourtant la perspective d'une banqueroute inéluctable, impossible à masquer plus longtemps à sa famille et au monde, qui lui est devenue insupportable et, probablement, lui a fait préférer la mort à la vie…

Rodolphe Diesel est né, le 18 mars 1858, au numéro 38 de la rue Notre-Dame-de-Nazareth, à Paris. Il se prénomme Rodolphe pour l'état civil français. Pour ses parents, ce sera toujours Rudolf… Du côté paternel, la famille a ses origines en Thuringe, mais son père Theodor, né en 1830, a grandi à Augsburg, où il a appris le métier de relieur. Dans les années qui suivent les révolutions avortées de 1848, à l'instar de nombreux Allemands, certains membres de la famille Diesel émigrent. Deux cousins de Theodor partent aux États-unis. Theodor, lui, décide de s'installer à Paris, après avoir beaucoup circulé en Europe centrale, de Vienne à Prague.

En 1858, la famille Diesel est installée à Paris, au 38 rue N-D de Nazareth. C'est là que Rudolf voit le jour.

L. DE SILVA - TAPABOR

M.A.N. VERARCHIV

Très tôt, Diesel (ici à 12 ans) manifeste sa pasion pour la mécanique.

Elise Strobel a, de son côté, quitté l'Allemagne pour Londres, où elle est devenue gouvernante. A la mort de son père, elle est retournée quelque temps à Nüremberg, avant de s'installer à Paris. Elle y enseigne l'allemand et l'anglais. C'est au sein de l'association parisienne *Teutonia*, que Theodor Diesel et Elise Strobel se rencontrent. Mais, on l'a dit, c'est à Londres qu'ils se marient le 10 septembre 1855. Pour l'anecdote, quand, vingt-deux ans plus tard, en 1877, ils s'installeront à Munich, l'administration bavaroise ne reconnaîtra pas la validité de ce mariage britannique, ce qui les contraindra à se remarier civilement. Trois enfants sont issus de ce mariage et Rudolf est entouré par deux sœurs : Louise, son aînée de deux ans et Emma, sa cadette née en 1860.

Au début des années 1860, les Diesel emménagent au 49 rue de la Fontaine-au-Roi (11e arrondissement),

J.L. CHARMET

Le Conservatoire des arts et métiers exerce un attrait particulier sur Rudolf. Il se plaît à dessiner les nouvelles machines qui y sont exposées.

J.L. CHARMET - EXPLORER ARCH - MUSEE CARNAVALET

1870 : la France est en guerre avec l'Allemagne (abattage d'un éléphant pour nourrir la population durant le siège de Paris). Les ressortissants allemands doivent prendre le chemin de l'exil.

dans une maison de deux étages qu'ils conserveront jusqu'après la guerre de 1870. Theodor y installe un atelier de maroquinerie, qui comptera jusqu'à six ouvriers allemands et deux apprentis. Sans doute ne roulent-ils pas sur l'or, mais leur vie est-elle aussi difficile que Rudolf la décrira plus tard ? Ils manquent parfois d'argent pour, le week-end, prendre l'omnibus et se rendre dans la maison de campagne qu'ils ont louée à Vincennes... En dépit des difficultés, cet atelier, où Rudolf, encore tout jeune enfant, aime venir jouer, laissera chez lui une indéniable empreinte affective. Quand, bien plus tard, Diesel développera ses vues sur l'organisation sociale idéale, le modèle de la petite entreprise y occupera une place centrale.

Theodor n'est pas seulement un artisan habile, il est aussi plein d'idées et très indépendant. Il diversifie ses activités. Dans les années 60, sa carte de visite commerciale indique qu'il est aussi fabriquant de jouets pour salons et jardins, par exemple de petits manèges. Ce qui implique le goût de la mécanique, d'ailleurs déjà présente dans l'atelier de maroquinerie avec la machine à coudre Singer. Bien que rousseauiste, ce qui devrait le pousser vers la simplicité, Theodor a le goût des beaux objets et du luxe. Il dépense sans compter. Elise, elle, est tout le contraire. Femme d'ordre, économe jusque dans les moindres détails, elle fait les comptes et tient la caisse.

En famille, on parle plutôt l'allemand que le français. Les Diesel ont d'ailleurs pris l'habitude d'engager une jeune fille autrichienne ou alsacienne comme aide ménagère. Rudolf, qui n'a pas encore atteint ses dix ans, est, aux dires d'Eugen Diesel, déjà curieux de machines. Dans la biographie de son père [3], Eugen raconte ainsi que Rudolf allait souvent contempler celles qui étaient exposées au Conservatoire des arts et métiers. Il aimait à les dessiner et l'on retrouve, dans l'un de ses cahiers, le croquis du camion de Cugnot. On sait aussi que la visite de l'Exposition internationale de 1867 fit forte impression sur lui.

Sa passion pour la mécanique lui vaudra néanmoins une punition mémorable. Car, chez les Diesel, l'éducation des enfants est sévère. Très sévère... Ainsi, pour s'être livré au démontage intempestif d'une horloge familiale, le jeune Rudolf a été attaché sur une chaise, pendant tout un dimanche, pendant que le reste de la famille partait s'aérer à la campagne... Lorsqu'il se promène avec son père, il n'est pas rare que celui-ci le fasse trébucher, le pousse inopinément dans un fossé. Pour lui apprendre à se tenir sur ses gardes, lui forger un caractère propre à toujours faire face à l'adversité... A la maison, Rudolf apprend l'anglais avec sa mère, ce qui ne va pas tarder à lui être utile.

Le 28 août 1870, les murs de la capitale se couvrent en effet d'affiches. Les ressortissants étran-

PHOTOS DEUTSCHES MUSEUM MUNCHEN

Elise et Theodor Diesel

3 – *Diesel, der Mensch, das Werk, das Schicksal*, Hamburg, Hanseatische Verlagsanstalt 1937.

gers appartenant à des pays en guerre avec la France sont tenus, s'ils ne possèdent une autorisation de séjour émanant du Gouverneur de Paris, de quitter le pays dans les trois jours. Le 1er septembre, à la suite de la défaite de Sedan, l'Empereur est fait prisonnier et la République aussitôt proclamée. Quelques jours plus tard, une nouvelle série d'affiches est placardée : les Allemands ont 24 heures pour plier bagages et, cette fois-ci, sous peine de prison.

Le 8 septembre, après deux jours et demi de voyage, la famille Diesel se retrouve à Londres. Qu'ont-ils pu sauver ? Rien, ou à peu près. Quelques économies, d'autant plus minces que les affaires parisiennes avaient sérieusement périclité dans le climat germanophobe ambiant. Il leur faut entamer une nouvelle vie, sans autre aide que quelques relations de jeunesse d'Elise, peu charitables ou inefficaces. Theodor trouve assez vite un emploi dans la maroquinerie ; Louise, qui n'a que quatorze ans, déniche une place de répétitrice de langue et de musique dans une petite école privée. Quant à Rudolf, d'abord envoyé dans une école anglaise, il va partir sous peu pour l'Allemagne.

En novembre 1870, sur le conseil insistant de membres de la famille restés outre-Rhin, ses parents l'envoient en effet à Augsburg, chez le professeur Christian Barnickel. C'est là qu'il poursuit sa scolarité en commençant par acquérir une bonne maîtrise de la langue. Il entre ensuite dans une école professionnelle pour deux années puis, pour deux années encore, dans un lycée technique. Au terme de ce cursus, il partira étudier la construction mécanique à l'Ecole supérieure technique de Munich.

Malgré les conseils répétés de ses parents qui souhaitent le voir élevé à la dure, la vie chez Barnickel est confortable. Cela n'incite pas Rudolf à la paresse. Au contraire, il étudie beaucoup, jusqu'à connaître

DEUTSCHES MUSEUM MÜNCHEN

En 1875, Diesel entre à l'Ecole technique de Munich pour y étudier la construction mécanique. Ses résultats feront date dans l'histoire de l'établissement.

migraines et insomnies. L'ambition, déjà... Il restera éloigné de ses parents, même lorsqu'en automne 1871, ils seront autorisés à rentrer à Paris. Rudolf écrit souvent. Le ton de ses lettres, souvent paternaliste et péremptoire, finit par provoquer un certain agacement. En témoigne la façon dont il leur annonce sa décision de devenir ingénieur : « *Chers parents, mon souhait le plus cher est de devenir ingénieur mécanicien. Dans tout autre domaine, je ne ferai rien de vraiment très bon (...). Si je n'étais pas venu en Allemagne en étant séparé de vous pendant quelques années, je serais sans doute assis aujourd'hui dans l'atelier et devrais travailler pour vous aider.* » Le souvenir d'une certaine journée, passée assis, enchaîné sur une chaise parce qu'il s'était pris pour un mécanicien, était-il encore présent ? Il faut bien le croire, puisque la phrase suivante de la lettre de Rudolf dit : « *Finalement, ainsi, je n'aurais plus eu la possibilité de penser à faire de la mécanique, mon désir le plus cher.* » Son père lui répond par une leçon de morale : « *Ne crois pas, cher Rudolf, que le bonheur consiste à acquérir une haute position sociale et des richesses. Pas du tout, mais dans nos relations au monde, nous devons nous efforcer de donner le meilleur de nous-même dans toutes les directions, de travailler consciencieusement avec l'esprit et la main, de faire le bien autant que nous le pouvons. Tout ceci est en nos capacités, quelle que soit notre situation sociale.* »

En 1873, Diesel retourne à Paris, où ses parents sont désormais installés au 127 boulevard Voltaire. C'est lors de ce séjour que meurt subitement Louise, l'enfant chérie de la famille. Bizarrement, il ne subsiste aucune trace écrite de la cause du décès. Ce drame semble avoir profondément affecté son père, qui trouve refuge dans la religion et le spiritualisme. Peu après, Theodor se découvre des dons de guérisseur. Avec l'aide financière de Rudolf, il deviendra magnétiseur, profession qu'au grand dam d'Elise, il exercera à Munich quand, au terme de toutes ses pérégrinations, le couple viendra y vivre.

En 1875, Rudolf Diesel entre à la *Technische Hochschule* de Munich. L'enseignement y est très pluridisciplinaire. Outre des cours classiques de construction mécanique centrés

sur l'étude des machines et le dessin industriel, Diesel s'initie à l'esthétique, à l'œuvre de Goethe, à la poésie, ainsi qu'à la philosophie, etc. Il lit beaucoup. Entre autres, Ernst Haeckel, le père fondateur de l'écologie scientifique. Il aime aussi Wagner, dont la musique futuriste suscite à Munich autant de passions que les folies architecturales chères à Louis II de Bavière. C'est aussi à la *Technische Hochschule*, lors des conférences de thermodynamique de Karl Linde, qu'il découvre le nom de Carnot. Sait-il que Sadi Carnot a fréquenté, lui aussi, le Conservatoire parisien des arts et métiers ? Peu importe... Diesel est fasciné par le cycle idéal que décrit la machine thermique de Carnot. Vers la fin de sa vie, il affirmera qu'à partir de 1878, cette fascination a en fait gouverné son existence !

A Munich, les résultats de Rudolf sont remarquables. Il finance ses études en donnant des leçons particulières, qui viennent compléter les bourses de l'État de Bavière. Pour pouvoir continuer à les recevoir, Diesel prend d'ailleurs la nationalité bavaroise. En juillet 1879, il attrape le typhus et se trouve dans l'incapacité de passer ses examens de fin d'études. Pour patienter jusqu'à la prochaine session, il passe un semestre en Suisse dans la société des frères Sulzer. De retour à Munich au début de l'année 1880, il obtient les meilleures notes jamais attribuées, dans l'histoire de l'Ecole, à un élève-ingénieur.

Son professeur Karl Linde lui propose immédiatement de l'embaucher et tire profit de son parfait maniement de la langue française pour l'envoyer à Paris. Linde y avait vendu la licence de fabrication de ses machines frigorifiques au baron Moritz von Hirsch. Dans un premier temps, Diesel travaille avec Hirsch pour un modeste salaire. Quelque temps plus tard, Hirsch revend ses droits à Linde et Diesel prend la direction de la filiale française de la société de Linde. Il voyage énormément à travers la France, la Belgique, l'Afrique du Nord, où il répare des machines, participe à de nombreuses réunions et négocie des contrats.

Il trouve quand même le temps d'avoir quelques aventures sentimentales. A peine arrivé à Paris, il tombe amoureux d'une artiste américaine. Celle-ci écrit à la sœur de Rudolf : « *Il a un tempérament artistique – un tempérament poétique – et un esprit très supérieur à la majorité des jeunes gens.* » Un temps, il songe à partir vivre avec elle aux États-unis. Mais il y renonce...

Fin 1882, chez un homme d'affaires allemand résidant à Paris, Ernest Brand, Rudolf rencontre Martha Flasche. Fille de notaire, elle s'occupe alors des deux enfants Brand. Il l'épousera moins d'un an plus tard. Lors de ses multiples déplacements, il lui écrit. En juin 1883, il est par exemple à Munich, où il est venu rendre visite à ses parents : « *Je sais d'expérience que des études de spiritisme menées avec des œillères peuvent transformer les hommes en de véritables idiots et je te prie donc d'être prudente...* », lui conseille-t-il. De quelle expérience personnelle s'agit-il ? Veut-il parler de son propre père qui, quelques mois plus tôt, a publié un ouvrage sur sa pratique de « *magnéto-thérapeute* » et s'égare de plus en plus dans le spiritisme ? Pourtant, la suite de la lettre ressemble étrangement aux anciennes leçons de morale paternelles : « *Nous devons aider nos frères sur cette terre, améliorer la situation de l'humanité, et soulager la pauvreté du mieux que nous pouvons. Cela me semble être une religion mieux comprise que celle qui néglige la vie terrestre au profit d'un futur inconnu.* » En substituant à la religion une foi inébranlable en la science et la technique, Diesel s'inscrit tout à fait dans l'air du temps.

DEUTSCHES MUSEUM MÜNCHEN

Karl Linde : ses conférences font découvrir Sadi Carnot à Diesel. Il lui offrira aussi son premier emploi.

Mais, plus original, il ne se contentera pas d'adhérer vaguement à de grands principes. Son ambition le poussera, nous le verrons plus loin, à développer une théorie complète et fort détaillée de la « *question sociale* ».

De l'union avec Martha naîtront trois enfants : Rudolf junior en novembre 1884, une fille, Hedy, en octobre 1885, et Eugen en mai 1889. Diesel, qui travaille beaucoup, est souvent absent. Périodiquement, sa correspondance avec Martha fait état de son mauvais état de santé. En mars 1886, par exemple : « *J'ai de nouveau de terribles migraines – je crois que cela vient de la nourriture. Tout est très gras et fortement assaisonné.* » En novembre de la même année, la situation s'est aggravée : « *Je suis tourmenté par de sévères insomnies à tel point que je vis comme dans un rêve.* » Comme on l'a vu, ce leitmotiv se fera entendre jusque dans son ultime lettre à Martha.

En France, le contexte économique et politique est de plus en plus défavorable aux entreprises d'origine allemande. Régulièrement, des rumeurs sur l'éventualité d'une nou-

PHOTOS DEUTSCHES MUSEUM MÜNCHEN

Rudolf Diesel, sa femme, Martha, et ses enfants : Eugen, Hedy, Rudolf. En 1900 : le moteur Diesel obtient le Grand Prix de l'Exposition de Paris.

velle guerre agitent Paris. En janvier 1887, par exemple, Diesel écrit à ses parents : « *Je dois dire que les choses semblent ici tellement instables que je me tiens prêt à émigrer à tout moment.* » Ce climat hostile lui interdit de nouer des contacts scientifiques et industriels pour développer ses idées. Cette solitude intellectuelle lui pèse et Diesel souhaite rentrer en Allemagne. En novembre 1889, Linde lui offre un poste à Berlin avec un salaire mensuel de 30 000 francs (de l'époque).

A Berlin davantage encore qu'à Paris, Diesel trouve le temps de mener des recherches personnelles. Il pense avoir découvert le moyen de réaliser le cycle idéal de Carnot dans un « *moteur rationnel* ». Début 1892, il rassemble ses idées dans un long manuscrit. Il sera publié un an plus tard, lorsque Diesel aura obtenu un brevet et trouvé des industriels pour financer le développement de son invention [4]. L'histoire de la conception, de la mise au point et de la commercialisation de ce moteur est exposée en détail dans un autre article de ce numéro (voir p. 46). On lira le récit d'un parcours semé d'embûches, où l'optimisme forcené de l'inventeur aboutit à la construction d'un objet technique nouveau.

Mais le prix payé par Diesel est très élevé. Le surmenage menace constamment. A cet égard, ses ennuis de santé s'apparentent à ceux de son moteur. L'une des originalités de ce dernier consiste en effet dans les pressions importantes qui règnent dans le cylindre et causent d'incessants problèmes de fuite et d'usure des pièces. Aux questions techniques – comment contrôler les processus à l'intérieur du moteur ? comment empêcher les fuites ? –, font écho des questions personnelles : comment garder le contrôle du développement du

4 – "Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmemotors zum Ersatz der Dampfmaschinen und der heute bekannten Verbrennungsmotoren." *Théorie et construction d'un moteur rationnel pour remplacer les machines à vapeur et les moteurs à combustion d'aujourd'hui.*

DEUTSCHES MUSEUM MÜNCHEN

Eugen Diesel se rebelle contre son père... Plus tard, il se fera son biographe.

moteur ? Comment empêcher les fuites d'information et protéger le brevet ? Comment concrétiser les retombées financières ? Etc, etc. Au fil des années, sa « pression interne » s'accroît dangereusement. Les migraines succèdent aux migraines, les nuits d'insomnie s'enchaînent : il reste éveillé, comme si, lointain écho des promenades avec son père, il lui fallait être en permanence sur ses gardes...

Il réussit un coup de maître en juin 1897, lors du congrès annuel de la Société des ingénieurs allemands. Un expert, le professeur Moritz Schröter, y présente les résultats d'essais menés avec le dernier prototype du « *moteur rationnel* ». Ils suscitent les plus grands espoirs parmi les ingénieurs et les journalistes présents. Au cours de la même réunion, Diesel se livre à une démonstration passablement mensongère : selon lui, le moteur présenté devant ses pairs constitue la réalisation pratique de sa théorie de 1892-1893. Or, ses écrits privés démontrent que Diesel est tout à fait conscient des écarts majeurs qui séparent théorie et pratique. Mais il lui faut protéger son brevet, envers et contre tout.

Après ce congrès, Diesel s'empresse de récolter les fruits de la renommée. Il signe des contrats de licence avec de nombreux fabricants étrangers, ce qui implique de longs voyages et de dures négociations. La tâche est lourde, alors que les problèmes techniques sont loin, très loin d'être résolus. Il doit également faire face à des procès au cours desquels il doit défendre, becs et ongles, la validité de son brevet. La pression devient bientôt insoutenable. La fortune de Diesel se construit en quelques mois, mais elle a un coût : son épuisement, qui l'oblige à un séjour de plusieurs mois en maison de repos, entre l'automne 1898 et le printemps 1899.

Il a auparavant pris plusieurs décisions malheureuses, lourdes de conséquences. Il a notamment fondé une société de construction de moteurs Diesel, dont le personnel se révèle vite incompétent. Deux ans plus tard, elle doit cesser toute activité et rembourser ses clients mécontents. Les petits actionnaires estiment avoir été trompés. Les journaux s'emparent de l'affaire et cherchent des boucs émissaires. La chute de cette société est en vérité difficile à comprendre : en 1900, l'année de cette déconfiture industrielle et financière, le moteur Diesel remporte le Grand Prix de l'Exposition universelle de Paris ! A la même époque, Diesel fait bâtir une extraordinaire maison, l'une des plus fastueuses résidences munichoises. Cette « folie » lui coûte 900 000 marks, ce qui représente, selon son fils Eugen, l'immobilisation d'un cinquième de sa fortune, estimée sur le papier (puisque sa plus grande partie correspond à des actions) à environ 5 millions de marks.

La famille emménage dans cette nouvelle demeure en 1901. On y donne de nombreuses fêtes, bals et réceptions. On y croise des amis, tels les membres de la famille d'Oskar von Miller, son ancien professeur Karl Linde, des relations d'affaires, tel l'Américain Adolphus Busch et le Suisse Jakob Sulzer-Imhoof. Comme le raconte Eugen Diesel, les conversations tournent souvent autour du fameux moteur, des besoins en carburant, des champs pétrolifères et du grand avenir des moteurs automobiles.

Rudolf Diesel ne sent pas pour autant la pression se relâcher. En 1901, l'année de la mort de son père (sa mère était décédée en 1897), il effectue un nouveau séjour en maison de repos. Le développement de son moteur se déroule largement sans son concours. Les « maladies de jeunesse » sont progressivement « guéries » par les ingénieurs de M.A.N. Diesel s'engage un temps sur un autre terrain, celui de la « *question sociale* ». Il tente d'appliquer à l'organisation de la société les méthodes « *rationnelles* » qui, dix ans plus tôt, l'ont guidé sur le chemin de son invention. En 1903, il publie un ouvrage fondé sur la notion de « soli-

DEUTSCHES MUSEUM MÜNCHEN

darisme » : *Solidarismus : Natürliche wirtschaftliche Erlösung des Menschen* (Solidarisme : la solution économique naturelle de l'humanité). On lira dans un autre article de ce numéro (voir p. 66) son étonnante vision de la société idéale. Publié à près de 10 000 exemplaires, le livre ne connaît aucun succès. Parallèlement, Diesel doit faire face à des procès de plus en plus nombreux. Ironie cruelle, ils lui sont intentés pour non-respect d'une clause de solidarité, clause qu'il avait tenu à inclure dans ses contrats de licence ! Il en conçoit une véritable haine pour le système judiciaire, comme l'indique cette phrase retrouvée parmi ses notes sur le *Solidarisme* : « *Les juges et les avocats sont de plus grands criminels que ceux qu'ils aident à emprisonner* » !

Outre ces ennuis, Diesel se lance dans des investissements malheureux, que ce soit en matière d'immobilier ou d'extraction pétrolière. Il en

En 1912, Diesel (ci-dessus à l'extrême gauche), désormais célèbre, effectue un second voyage aux Etats-Unis afin d'y promouvoir son moteur. Il accompagne une commission d'études du *Deutsches Museum*.

garde jalousement le secret et maintient, contre vents et marées, une façade prestigieuse. A côté de ses nombreux voyages d'affaires, Rudolf Diesel emmène sa famille en vacances en Autriche, en Italie, en Suisse, en France et en Angleterre. Ils ne descendent que dans des hôtels de première classe… A partir de 1905, ils se déplacent dans la première voiture achetée par Diesel : une superbe NAG sept places. Ne lui faut-il pas se familiariser avec tous les aspects de l'automobile avant de concevoir un moteur adapté ?

Pour que son nom continue de briller au firmament des ingénieurs, Diesel fonde de grands espoirs sur son fils aîné, Rudolf. Mais, celui-ci, d'une « *nature mélancolique* » selon sa sœur, ne parviendra jamais à les satisfaire. Diesel tentera ensuite d'intéresser son gendre, marié à Hedy en 1909, au développement de ses nouvelles idées techniques. Sans grand succès… Il reportera enfin son ambition sur son dernier fils, le poussant à devenir ingénieur. Eugen s'y refusera violemment, et entreprendra des études de géologie avant de se consacrer aux sciences sociales et, bien plus tard, à… la biographie de son père.

Par deux fois, Diesel se rend aux États-unis. En 1904, avec sa femme, il traverse le pays d'est en ouest, de Boston à San Francisco, en passant par Saint-Louis, lieu d'une grande Foire internationale. Diesel y rend visite à Adolphus Busch, le brasseur américain qui, en octobre 1897, lui avait versé 1 million de marks pour obtenir la licence de fabrication de

COLLECTIONNEZ LES GRANDES PAGES DE L'HISTOIRE DES SCIENCES

COLLECTION 1996
LES GRANDS INGÉNIEURS

En 1996, LES CAHIERS DE SCIENCE & VIE vous font découvrir les grands ingénieurs et les temps forts de leur invention. Faites la connaissance scientifique de six hommes d'exception :

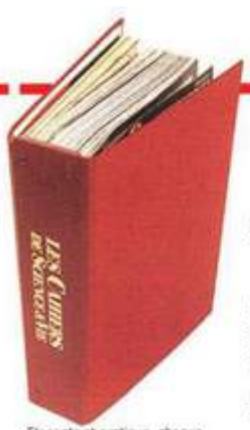
DIESEL

EDISON

LÉONARD DE VINCI

EIFFEL

ETC...



Elegante et pratique, chaque reliure est conçue pour classer 12 numéros des CAHIERS DE SCIENCE & VIE

BON DE COMMANDE

à compléter et à retourner avec votre règlement à l'ordre des CAHIERS DE SCIENCE & VIE sous enveloppe affranchie à : Service VPC- 1, rue du Colonel Pierre Avia 75503 Paris cedex 15.

❑ **Je commande** LA COLLECTION 1996 des CAHIERS de SCIENCE & VIE du n° 31 au n° 36 inclus : 160 francs au lieu de 192 francs*

Les numéros déjà parus me parviendront dans un délai de 3 semaines. Les numéros à venir me parviendront au fur et à mesure de leur parution.

❑ **Je commande** ..... reliure(s) des CAHIERS de SCIENCE & VIE au prix unitaire de 65 francs - étranger 75 francs

• Le montant de ma commande est de ..... francs

Nom

Prénom

Adresse

Code postal Ville

Offres valables jusqu'à fin 1996 et réservées à la France Métropolitaine
Etranger: nous consulter Tel (33-1) 46 48 47 08 ou 46 48 47 11

(*) Prix de vente normal chez votre marchand de journaux

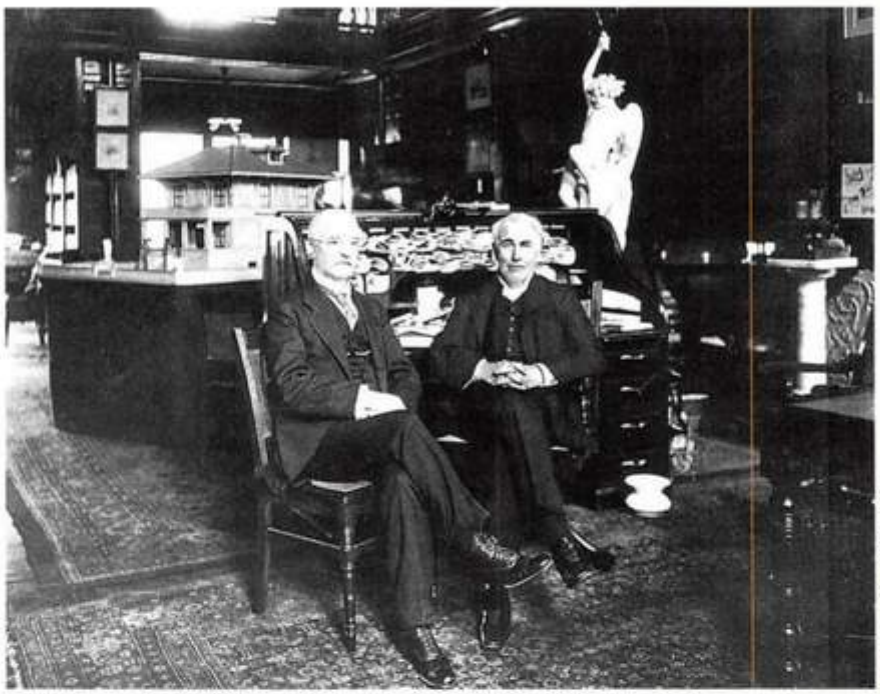
En application de l'article L 27 de la loi du 6/01/1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande et sont exclusivement communiquées au destinataire la traitant. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès d'Excelsior. Vous pouvez vous opposer à ce que vos nom et adresse soient communiqués ultérieurement.

RC PARIS B 572 134 773

CSV 3

son moteur. Au cours de son voyage, Diesel tient un journal : ses notes, très précises, concernent plus ce qu'il observe, les trains, les villes et les femmes, que ses rendez-vous d'affaires. Son regard est très critique : l'esthétique est négligée, déplore-t-il, les femmes sont « *grosses et paresseuses* », la culture est le parent pauvre d'une société uniquement mue par le progrès technique, le dollar règne en maître absolu, etc. Cette vision négative se retrouve souvent dans les comptes-rendus des visiteurs européens de l'époque. Elle est plus surprenante lorsqu'elle provient de Rudolf Diesel. A-t-il oublié ses précédents discours sur la technique triomphante ? A-t-il perdu de vue le million de marks d'A. Busch ? Diesel souligne cependant quelques aspects positifs, notamment les bibliothèques publiques et universitaires de la côte Est, celles des universités de Columbia et de Harvard en particulier. Les qualités du laboratoire d'essais des locomotives de Columbia retiennent aussi toute son attention.

Huit ans plus tard, il retourne aux États-unis en compagnie d'une commission d'études du *Deutsches Museum*. Toutefois, son objectif principal consiste à promouvoir son moteur. Sa tournée se limite à quelques villes de la côte Est : New-York, Philadelphie, Boston, poussant jusqu'à Chicago. La presse américaine publie alors de nombreux articles sur lui, annonçant l'émergence d'un nouvel âge du pétrole. Il est désormais célèbre. Le 6 mai, peu de temps avant de prendre le chemin du retour, Diesel rencontre Thomas Edison à West Orange, dans le New Jersey. Les deux hommes évoquent leurs méthodes personnelles pour « inventer », s'entretiennent de leurs voyages respectifs. Edison lui confie ainsi garder un souvenir ennuyeux de l'Italie, avec toutes ses églises… En dépit de l'accueil qui lui a été fait, ce voyage ne met pas de baume au cœur de Diesel. A bord du bateau qui le ramène vers l'Europe, il écrit dans son journal : « *Pluie terrible, brouillard, triste départ.* »



DEUTSCHES MUSEUM MÜNCHEN

Thomas Edison reçoit Rudolf Diesel. Les deux hommes parlent inventions et échangent des souvenirs de voyages.

La perspective de retrouver ses ennuis quotidiens n'avait probablement rien de réjouissant. Durant les mois suivants, à plusieurs reprises, Diesel évoquera devant sa femme l'idée de vendre leur maison munichoise, voire de s'établir aux États-unis, où il pourrait devenir consultant. Mais il ne lui fournit aucune explication, il est incapable de justifier ce désir soudain de changer de vie, à plus de cinquante ans, et Martha refuse…

Alors que le moteur qui porte son nom connaît un succès grandissant dans l'équipement des bateaux, Diesel est invité, en novembre 1912, à s'exprimer devant les membres de la Société allemande des constructeurs maritimes. Lassé d'entendre les critiques des uns et des autres, Diesel saisit cette occasion pour développer sa version personnelle de la naissance de son invention. Lors de la discussion suivant son exposé, il est attaqué avec virulence par divers professeurs de l'Université de technologie de Berlin-Charlottenberg, tel Alois Riedler. Selon celui-ci, les théories de Diesel n'ont jamais été réalisées dans le moteur lui-même qui, dans sa forme actuelle, est davantage le produit des ingénieurs de chez MAN. Le débat s'envenime, mais l'audience prend le parti de Diesel.

Le texte de cette conférence, largement remanié, donnera plus tard matière à publication d'un livre : *Die Entstehung des Dieselmotors* (*La genèse du moteur Diesel*). En septembre 1913, Diesel rédige une poignante dédicace à l'attention de son fils Eugen : « *Ce livre contient principalement les aspects techniques de l'œuvre de ma vie, le squelette. Peut-être seras-tu capable d'ajouter de la chair à ce squelette, en ajoutant ces éléments humains que, plus que tout autre, tu as vécus et compris.* » Trois semaines plus tard, son cadavre flottait sur la mer du nord… ■

ACTEURS HUMAINS ET NON HUMAINS

Le processus de l'invention trame de façon nouvelle des idées, des techniques, des hommes et des capitaux, bref des acteurs de différentes natures et qui ne sont pas forcément appelés à se rencontrer. Cela pour justifier que la thermodynamique de Sadi Carnot se retrouve un jour mise en relation, entre autres, avec le magnat de la sidérurgie, Alfred Krupp, avec des ingénieurs mécaniciens ou avec l'industrie naissante du pétrole. Tout cela par l'effet d'un opérateur : Rudolf Diesel.

MARY EVANS - EXPLORER

De Sadi Carnot

Il y a au départ la théorie, celle du père de la thermodynamique, Sadi Carnot. Puis l'idée folle de la concrétiser. Quelque matériel de base : des notions scientifiques, des techniques industrielles... Et puis des hommes, comme dans toute entreprise humaine... Industriels, amis, détracteurs, jouent autour de Rudolph « l'invention du moteur Diesel ».

Par Konstantinos Chatzis

1 LES OBJETS THÉORIQUES

LA PRESSION

La pression, en tant que grandeur physique, se définit par le quotient d'une force et de la surface sur laquelle celle-ci s'exerce. Dans le système d'unités internationales, la pression est aujourd'hui exprimée en pascals (Pa) : un pascal représente l'application d'une force de un Newton sur une surface d'un mètre carré. De fait, un pascal est une très petite unité. Par habitude, on continue ainsi à employer le bar (1 bar équivaut à 10^5 Pa). Au XIXe siècle, l'unité utilisée est fréquemment l'atmosphère (1 bar = 0, 987 atmosphère). Pour donner un ordre de grandeur, dans les moteurs à vapeur conventionnels de la seconde moitié du XIXe siècle, comme dans les moteurs à combustion interne d'Otto par exemple, la pression maximale à l'intérieur du cylindre est de quelques atmosphères.

LE CYCLE DE CARNOT

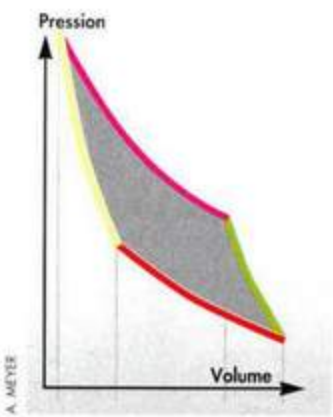
En 1824, Sadi Carnot publie à compte d'auteur un petit livre qui passe alors inaperçu : *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance.* Il y décrit un moteur thermique théorique qui, par une série d'opérations, revient à son état initial. En hommage tardif à son auteur, ce cycle sera plus tard connu de tous les élèves ingénieurs sous le nom de cycle de Carnot [1].

L'ouvrage de Carnot ne contient que quelques sommaires croquis. Il faut attendre dix ans pour que son premier vrai lecteur, Clapeyron, dessine un diagramme permettant de visualiser ce cycle appelé à un bel avenir. Le diagramme met en relation la pression (en ordonnées) et le volume (en abscisses) de la substance motrice (voir figure).

Le moteur théorique de Carnot est constitué d'un piston qui se déplace, sans frottements, dans un cylindre sous l'action d'une substance motrice, l'air par exemple. A cela, s'ajoutent deux sources de chaleur : pour Carnot, celle-ci est encore assimilable à un fluide qui "s'écoule" entre corps de températures différentes. Au début du cycle, la substance motrice se trouve à la température de la source chaude (plus exactement, très légèrement en-dessous de cette température afin qu'un échange puisse avoir lieu). Les étapes sont les suivantes :

1) Le cylindre est mis en contact avec la source chaude. De la chaleur passe alors de cette source à la substance motrice. Le piston se déplace

1. Voir le numéro des *Cahiers de Science et Vie* sur Sadi Carnot, L'insaisissable idéal de la machine, p. 58.



à Alfred Krupp

librement, sous l'effet de la détente de l'air. La *détente* se fait sans augmentation de température, elle est dite *isotherme*.

2) La source chaude est retirée. L'air, à l'intérieur du cylindre, est thermiquement isolé, grâce aux parois de ce dernier. Il continue sa *détente*, qui est cette fois *adiabatique* (pas d'échange de chaleur avec l'extérieur). Par le biais de cette détente, l'air se refroidit jusqu'à la température de la source froide (plus exactement, très légèrement au-dessus de cette température).

3) Le cylindre est mis en contact avec la source froide. L'air subit une compression et cède de la chaleur à la source froide de telle manière que sa température n'augmente pas : la *compression est isotherme*.

4) La source froide est retirée, le cylindre se trouve à nouveau thermiquement isolé. Le piston est comprimé jusqu'à sa position de départ. La *compression* est *adiabatique*. La chaleur générée par cette compression permet à l'air d'atteindre la température de départ. Et le cycle peut recommencer...

Ce cycle idéal est totalement réversible : en théorie, le moteur peut ainsi transformer du travail en chaleur. De plus, grâce à un raisonnement par l'absurde fondé sur l'impossibilité d'un mouvement perpétuel, Carnot démontre qu'on ne peut imaginer un cycle plus efficace.

La représentation du diagramme de Clapeyron offre un avantage très utile en pratique. La surface délimitée par les portions de courbes décrivant un cycle représente en effet le travail fourni par le moteur. Pourquoi ? On sait qu'en physique, un travail désigne une force (F) multipliée par une longueur (L). Or, la pression (P) est elle-même une force divisée par une surface (une longueur au carré) : $P = F/L^2$. Calculer une aire sur le diagramme de Clapeyron revient à multiplier une pression (F/L^2), en ordonnée, par un volume (une longueur au cube, L^3), en abscisse. Le résultat ($F/L^2 \times L^3$) a bien la dimension d'un travail : $F \times L$.

Le rendement

Carnot ne s'est pas contenté de démontrer l'efficacité maximale théorique de son cycle. Il a également exprimé qu'elle dépendait uniquement de l'écart de température entre les sources chaude et froide. Autrement dit, quelle que soit la substance motrice utilisée dans un moteur, le rendement est limité par ses températures maximale et minimale de fonctionnement. Après l'édification de l'échelle des températures absolues, ce rendement thermique maximal (quotient du travail produit sur l'énergie utilisée) se calcule simplement. Il est égal à $1-T_1/T_2$, où T_1 est la température de la source froide et T_2 celle de la source chaude.

En conclusion de ses *Réflexions*, Carnot se livre à quelques calculs de rendement en choisissant ses exemples « *parmi les meilleures machines à vapeur connues.* » Il en tire le constat suivant : « *1/20 seulement de la puissance motrice du combustible a été utilisé.* » Peut-on faire mieux ? Carnot, qui destine son ouvrage à des praticiens, met en garde ses lecteurs : « *On ne doit pas se flatter de mettre jamais à profit, dans la pratique, toute la puissance motrice des combustibles. Les tentatives que l'on ferait pour approcher de ce résultat seraient même plus nuisibles qu'utiles, si elles faisaient négliger d'autres considérations importantes.* ***L'économie du combustible n'est qu'une des conditions à remplir par les machines à feu ;*** *dans beaucoup de circonstances, elle n'est que secondaire, elle doit céder le pas à la sûreté, à la solidité, à la durée de la machine, au peu de place qu'il faut lui faire occuper, au peu de frais de son établissement, etc.* »

Qui a lu les conseils de Carnot ? Probablement peu d'ingénieurs de la fin du XIXe siècle... L'amélioration du rendement thermique, hors de toute autre considération, sert de guide à de nombreuses

Sadi Carnot

COLL. PARTICULIÈRE. CLICHÉ POLYTECHNIQUE

Henry Bessemer

ARCHIVES PHOTOS

recherches. Il est vrai que la machine à vapeur offre un rendement thermique qui semble dérisoire. Mais certains en viennent à oublier qu'un moteur se caractérise, en finale, par un rendement net : celui-ci s'obtient en mesurant la quantité de travail effectivement disponible sur l'arbre, divisée par la quantité de chaleur dépensée. Ce rendement net tient donc compte du rendement mécanique, parfois appelé rendement organique car lié au fonctionnement des « organes » du moteur. De fait, le rendement net est le résultat du produit du rendement mécanique et du rendement thermique.

L'efficacité réelle des différents types de moteurs thermiques apparaît alors sous un autre jour. Ainsi, la machine à vapeur, dont les organes mécaniques travaillent sous de faibles pressions, bénéficie d'un rendement mécanique élevé. Son rendement net est de l'ordre de 12 à 13 %... Celui des moteurs à combustion interne de type Otto et Langen peut atteindre 20 %.

LA COMBUSTION ISOTHERME

Dans la plupart des moteurs à combustion interne, la combustion est dite explosive, c'est-à-dire qu'elle se produit de manière presque instantanée. A l'intérieur du cylindre, le volume reste sensiblement constant et la combustion s'accompagne d'une augmentation de température et de pression du mélange gazeux. Ce faisant, puisqu'une partie de la chaleur produite sert à élever la température du mélange (en langage savant, à augmenter "l'énergie interne" du mélange), le processus engendre une *perte* : une partie de l'énergie produite n'est pas transformée en travail mécanique utile.

Peut-on imaginer un processus qui permette de s'affranchir de cette perte ? Un détour par les lois des gaz parfaits fait entrevoir la solution. La combustion explosive décrite ci-dessus illustre la loi de Gay-Lussac : à volume constant, la pression d'un gaz est proportionnelle à sa température absolue. Mais que dit la loi de Boyle-Mariotte ? Elle exprime qu'à température constante, le volume d'une masse de gaz est inversement proportionnel à sa pression. On peut ainsi concevoir une combustion sans élévation de température (isotherme), où toute la chaleur produite serait employée à accroître volume et pression.

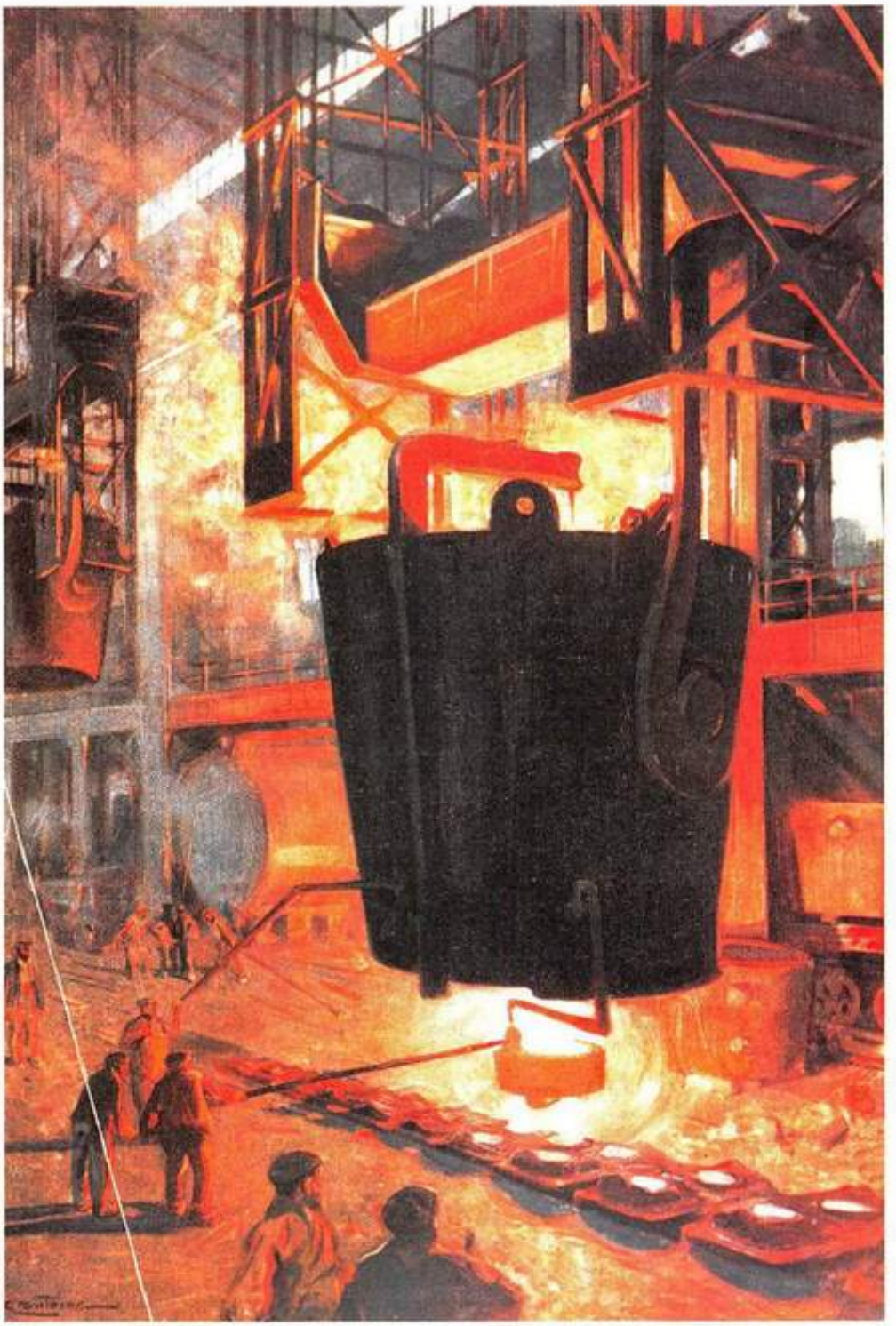
Comment y parvenir ? Le processus ne peut plus être instantané, il faut imaginer une introduction progressive du combustible dans le cylindre : la tendance naturelle du mélange à élever sa température avec la combustion serait alors exactement compensée par la tendance naturelle du mélange à abaisser sa température lorsque son volume s'accroît par le déplacement du piston. Pour réaliser pleinement ce processus idéal de conversion intégrale de chaleur en travail, il faut par ailleurs remplir une autre condition : le cylindre doit contenir une quantité d'air beaucoup plus importante que celle strictement nécessaire pour la combustion d'une quantité donnée de combustible. C'est la détente de cet air supplémentaire qui permettra d'absorber l'augmentation de la température.

La traduction pratique de ces principes théoriques exige de répondre à deux questions : 1/comment assurer la progressivité du processus de combustion, alors que les intervalles de temps sont très courts ? 2/quel volume d'air supplémentaire introduire dans le cylindre sans augmenter considérablement ses dimensions ?

2 LES TECHNIQUES

L'ACIER ET SON INDUSTRIE

Alliage de fer et de carbone, l'acier se distingue de la fonte, alliage des mêmes éléments, par sa teneur en carbone. Si la fonte contient jusqu'à 6 % de carbone, l'acier, lui, n'en renferme pas plus de 2 %.



L. DE SILVA APABOR

L'industrie de l'acier prend son essor dans les années 1860.

L'acier est un alliage ductile, c'est-à-dire qu'il peut être étiré de façon importante sans se rompre (ce n'est pas le cas de la fonte). Il est de plus susceptible d'acquérir une grande dureté, s'il est chauffé à une température suffisamment élevée et rapidement refroidi : il « prend la trempe ». Ses propriétés de résistance et de dureté sont à l'origine de son très large éventail d'utilisation. Le développement industriel de l'acier a toutefois longtemps buté sur des questions de nature économique. Dans les années 1850, l'acier reste un produit rare et cher. C'est avec l'apparition de deux procédés, Bessemer et Martin-Siemens, respectivement en 1855 et 1865, que l'industrie de l'acier prend son essor.

Avant 1850, l'acier est surtout utilisé pour la fabrication de canons, puis des grandes pièces destinées aux navires cuirassés. Après 1855, l'acier produit grâce aux nouveaux procédés trouve son premier débouché de masse dans la construction des rails. Dès 1880 à Chicago, il est employé dans le secteur de la construction, par exemple pour l'ossature des immeubles. En France, il est autorisé pour la construction des ponts en 1891. A Paris, Resal l'emploie pour le pont Mirabeau (1894), puis le pont Alexandre III (1898).

L'acier est également utilisé pour la construction des locomotives et des bandages de leurs roues motrices, des câbles, des arbres de machines. Dès 1860, sa production suit une courbe de croissance ininterrompue... Celle des quatre grands pays industriels (Grande-Bretagne, Etats-Unis, Allemagne, France) bondit de 0,94 millions de tonnes en 1840 à 8,2 millions en 1880, puis 25,2 en 1900.

Pourtant, dans les années 1880, cet alliage, dont les qualités ne font que généraliser son emploi, demeure mal connu sur le plan scientifique. Par exemple, la théorie du phénomène de la trempe, esquissée en 1869, n'est achevée que 16 ans plus tard, par Werth et Osmond, ingénieurs au Creusot. Osmond sera également le premier à préciser la nature des constituants des fontes et des aciers en 1894.

L. DE SELVA - TAPABOR

Aux Etats-Unis, Drake découvre la première source jaillissante de pétrole en 1859.

Ce retard dans la connaissance scientifique de l'acier est à l'origine de problèmes quant à son utilisation dans des conditions où températures et pressions sont élevées. Ce qui est le cas, par exemple, des moteurs à combustion interne...

LES COMBUSTIBLES

Les combustibles sont des matières capables de brûler lorsqu'elles sont au contact de corps dits comburants – à savoir l'air, l'oxygène, ou un mélange gazeux contenant de l'oxygène – en produisant une quantité de chaleur (une énergie thermique) utilisable. Les combustibles peuvent être solides, tels que le bois ou le charbon. Liquides, ils proviennent principalement du raffinage du pétrole. Quant aux combustibles gazeux, ce sont surtout les gaz naturels, qui proviennent de gisements soit spécifiques, soit associés à des gisements pétrolifères. Il existe toutefois des gaz manufacturés, produits par certaines réactions industrielles et récupérés pour actionner des moteurs industriels, comme les *gaz de cokerie*.

La substitution progressive des combustibles liquides aux solides constituera l'une des caractéristiques de l'évolution de l'industrie au cours de la première moitié du XXe siècle.

LE PÉTROLE ET SON INDUSTRIE

Combustible liquide fossile, le pétrole est composé d'hydrocarbures divers. Il est connu depuis l'antiquité, surtout à travers le bitume et l'asphalte, qui sont ses produits de dégradation de surface. Du pétrole liquide avait également été remarqué sous la forme de suintements : certains textes anciens du Proche-Orient parlent *« d'eau qui brûle »*...

Le pétrole entre dans son ère industrielle le 27 août 1859. A cette date, le colonel Drake atteint une nappe jaillissante de pétrole, à 22 mètres de profondeur. Nous sommes à Titusville, en Pennsylvanie. Les Etats-Unis sont le pays pionnier de l'industrie du pétrole. Tout au long du XIXe, ils en restent les maîtres incontestés. A la fin du siècle,

ils assurent, avec la Russie, la presque totalité de la production de pétrole : en 1896, les Etats-Unis en produisent 8 millions de tonnes, la Russie 6 millions, tandis que les autres pays, réunis, 1 million seulement... L'Europe possède quelques gisements en Galicie, dans le Hanovre, en Alsace et dans les environs de Parme.

Les pétroles d'origines géographiques diverses présentent des différences considérables, tant par leurs propriétés physiques que chimiques. Le pétrole américain, par exemple, est fluide, le russe est dense et sirupeux... Dans les raffineries, ils sont soumis à des traitements pour les séparer en diverses fractions, destinées à des usages différents.

Les fractions moyennes des distillats, tel le pétrole blanc employé pour l'éclairage, constituent l'un des premiers débouchés de l'industrie pétrolière naissante. Après 1885, les huiles de pétrole (fractions les plus lourdes du distillat) se substituent progressivement aux huiles végétales en tant que lubrifiants industriels.

C'est l'essor de l'industrie des moteurs à combustion interne, aussi bien pour les automobiles que pour les avions, qui va donner le véritable coup d'envoi de l'industrie pétrolière, la poussant à réaliser de multiples innovations techniques... Très sensibles aux propriétés des carburants, les divers types de moteurs ont en effet besoin, pour être performants, de produits répondant à des exigences de qualité et de normalisation non satisfaites par l'industrie du siècle précédent. Vers 1900, la production pétrolière mondiale atteint 20 millions de tonnes.

L'INJECTION

Comment obtenir, dans le cylindre d'un moteur Diesel, un bon mélange combustible/air ? Dans ses premières années, le procédé d'injection du combustible est pneumatique : c'est sous la poussée de l'air comprimé que le combustible peut entrer, finement pulvérisé, dans le cylindre.

Dans ce type d'injection, deux dispositifs entrent en jeu : le compresseur et le pulvérisateur. Le compresseur permet de porter l'air à une pression supérieure à celle qui règne dans la chambre de combustion. L'air va ensuite permettre la pulvérisation du combustible, à travers le pulvérisateur. Celui-ci communique avec la chambre de combustion par un canal.

Au moment de l'admission, l'air comprimé se précipite à travers les perforations du dispositif. Ce faisant, il entraîne le combustible, qui est apporté sur le pulvérisateur par une pompe à piston. Le combustible est ainsi projeté, finement pulvérisé, dans la chambre de combustion.

L'injection pneumatique sera supplantée dans les années 1920 par un autre procédé : l'injection mécanique.

3 PROFESSEURS ET INDUSTRIELS

De 1861 à 1864, **Karl von Linde** (1842-1934) poursuit ses études à l'Ecole polytechnique de Zürich. Ses enseignants sont Clausius, Zeuner, Reuleaux... A l'issue de ces trois ans, il est ingénieur et commence une carrière dans l'industrie des locomotives. Quelques années plus tard, il enseigne à l'Université technique de Munich – la *München Technische Hochschule*. Nous sommes en 1868 et celle-ci ouvre à peine ses portes. En 1872, Linde y occupe la chaire des machines. En 1875, il est à l'origine de la création du premier laboratoire de conception de machines en Allemagne. Ses recherches sur la théorie de la chaleur, de 1873 à 1877, l'amènent à développer la première machine de réfrigération à compression. En 1879, il quitte l'université pour fonder la *Gesellschaft für Linde's Eismaschinen*. Cette société va lui permettre de développer industriellement son réfrigérateur, qui va connaître une réussite internationale. Néanmoins, en 1891, Linde se retire de la direction de ses entreprises et reprend, à temps partiel, ses fonctions de professeur et de chercheur à l'Université technique de Munich. En 1895, il réussit un nouvel exploit, la liquéfaction de l'air.

Membre de l'Académie bavaroise des sciences, correspondant de l'Académie de Vienne, Linde est anobli en 1897, pour ses divers travaux. Sa carrière ne s'arrête pas pour autant... Il développe des procédés permettant d'obtenir de l'oxygène pur (1902), de l'azote pur (1903), et de l'hydrogène au moyen d'une condensation partielle du monoxyde de carbone (1909). Linde fonde un groupe d'entreprises, en Europe et outre-mer, afin d'industrialiser ces procédés. En 1902, il crée aussi le premier laboratoire allemand de physique appliquée à l'Université technique de Munich.

A l'instar de Linde, **Moritz Schröter** (1851-1927) enseigne à l'Université technique de Munich, lorsque Diesel y est étudiant. Schröter est spécialiste des moteurs thermiques et des questions de thermodynamique. Il fait partie des leaders du mouvement en faveur du remplacement de la machine à vapeur par des moteurs thermiques au rendement plus élevé. Rallié à la cause du moteur Diesel, il conduit les essais officiels du nouveau moteur, le 17 février 1897 à Augsburg. Le 16 juin de la même année, lors de la rencontre annuelle de l'Association des ingénieurs Allemands à Kassel, Schröter se livre à une présentation enthousiaste de l'invention.

Ingénieur issu de l'université technique de Karlsruhe, **Heinrich von Buz** (1833-1918) dirige successivement la

J.L. CHARMET - EXPLORER

temps de travail, système de protection contre les accidents, développement de logements sociaux... Ces mesures ont surtout pour but de neutraliser, au sein de la classe ouvrière, les idées socialistes et l'influence des syndicats.

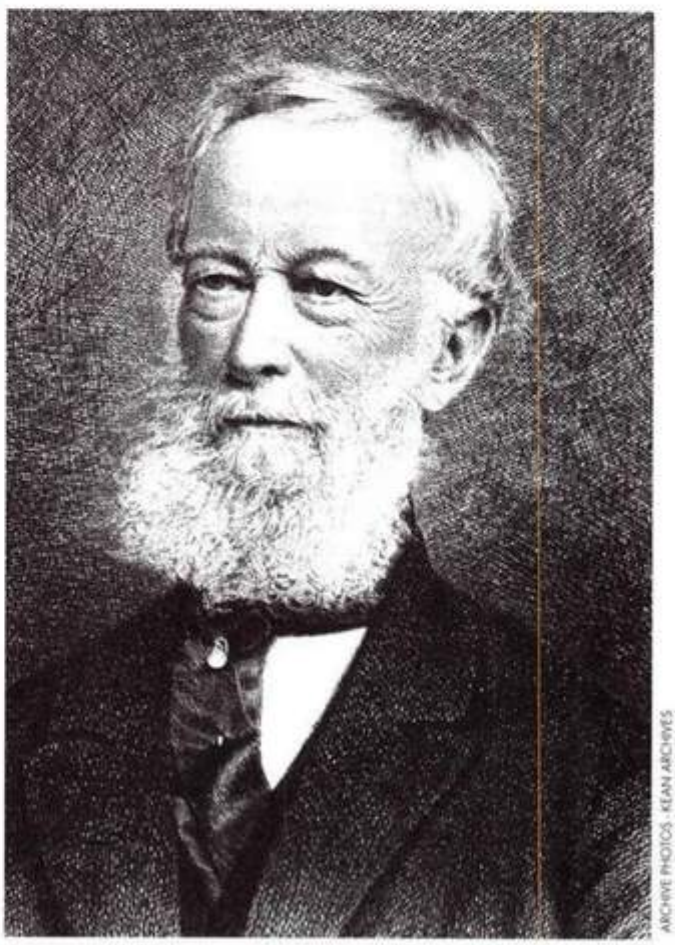
Avec d'autres grands industriels, Krupp en particulier, il invente le « mouvement paternaliste ». Ce courant se développe en Allemagne pendant la seconde moitié du XIXe siècle, anticipant les mesures de politique sociale qui caractériseront « l'Etat-providence » moderne. C'est Bismarck, qui,

Maschinenfabrik Augsburg et la Maschinenfabrik Augsburg-Nüremberg (MAN), spécialisées dans la construction mécanique. Premier soutien industriel de Diesel, il joue un rôle déterminant dans le développement du moteur.

Buz fait partie des « grands patrons » du XIXe siècle. Dès les années 1870, il prend une série de mesures de politique sociale en faveur de ses employés : réduction du

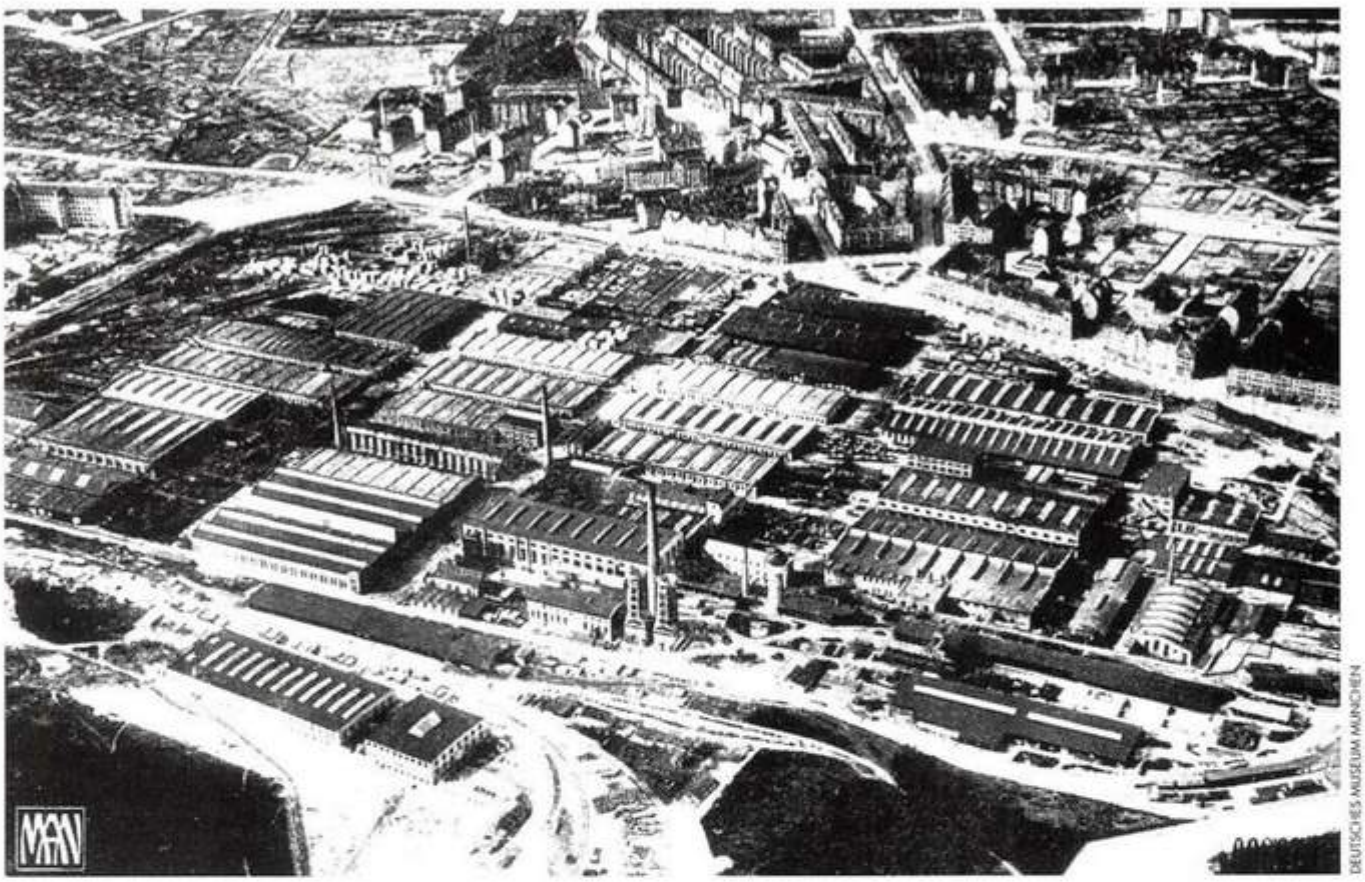
DEUTSCHES MUSEUM MÜNCHEN

Heinrich von Buz



ARCHIVE PHOTOS - KEAN ARCHIVES

Alfred Krupp et ses ateliers (ci-dessus)



DEUTSCHES MUSEUM MÜNCHEN

dans les années 1880, confronté à la force montante du parti social-démocrate, ouvre la voie : loi sur l'assurance-maladie (1883), lois sur les accidents de travail (1884) et sur l'assurance vieillesse-invalidité (1889),...

Surnommé le *« Bismarck de l'industrie allemande »*, Buz est anobli en 1907. Il se retire des affaires industrielles en 1913.

Décembre 1898. Deux entreprises bavaroises fusionnent : la Maschinenfabrik Augsburg et la Maschinenfabrik Nüremberg. La **M.A.N.** (Maschinenfabrik Augsburg-Nüremberg) est née. Elle produit des wagons pour le chemin de fer, des équipements de transport, des machines à essence et surtout, des machines à vapeur. C'est alors l'entreprise la plus importante dans le secteur de la construction mécanique allemande, mise à part la fabrication des équipements électriques.

Industriels allemands, les Krupp sont à la tête d'un véritable empire industriel. **Alfred Krupp** (1812-1887) reprend, à la mort de son père, la petite fabrique d'acier que ce dernier avait créée en 1811, à Essen. Il commence par mettre au point, en 1847, son propre procédé de production d'acier, avant d'importer en 1862 celui de l'Anglais Bessemer (1855). Krupp produit des roues, des essieux, des wagons, des tiges de piston, des ancres, des plaques courbes pour chaudières à vapeur et vaisseaux cuirassés... L'entreprise doit d'abord sa célébrité à la fabrication de canons de dimensions de plus en plus imposantes. Fournisseur principal du gouvernement prussien, Krupp produit notamment les énormes canons qui servent à bombarder Paris, lors de la guerre de 1870.

En 1865, Alfred Krupp est à la tête de quelque 9 000 ouvriers. A sa mort, en 1887, sa société est l'une des plus puissantes industries d'Allemagne, comptant plus de 20000 ouvriers. Sa gestion de la main d'œuvre fournit un

La M.A.N (Maschinenfabrik Augsburg-Nüremberg)

des premiers exemples de gestion paternaliste en Europe : en échange de l'obéissance et du contrôle moral et social du comportement de ses ouvriers, l'entreprise met à leur disposition des logements sociaux, des écoles pour leurs enfants, des systèmes de retraite...

A la mort d'Alfred, son fils, Friedrich-Alfred, prend la relève. Il acquiert en particulier les gigantesques chantiers navals *Germania Werft*, de Tegel. Il fait prospérer l'entreprise paternelle qui, en 1902, atteindra les 43 000 ouvriers,

et disposera d'un capital doublé par rapport à celui légué par son père.

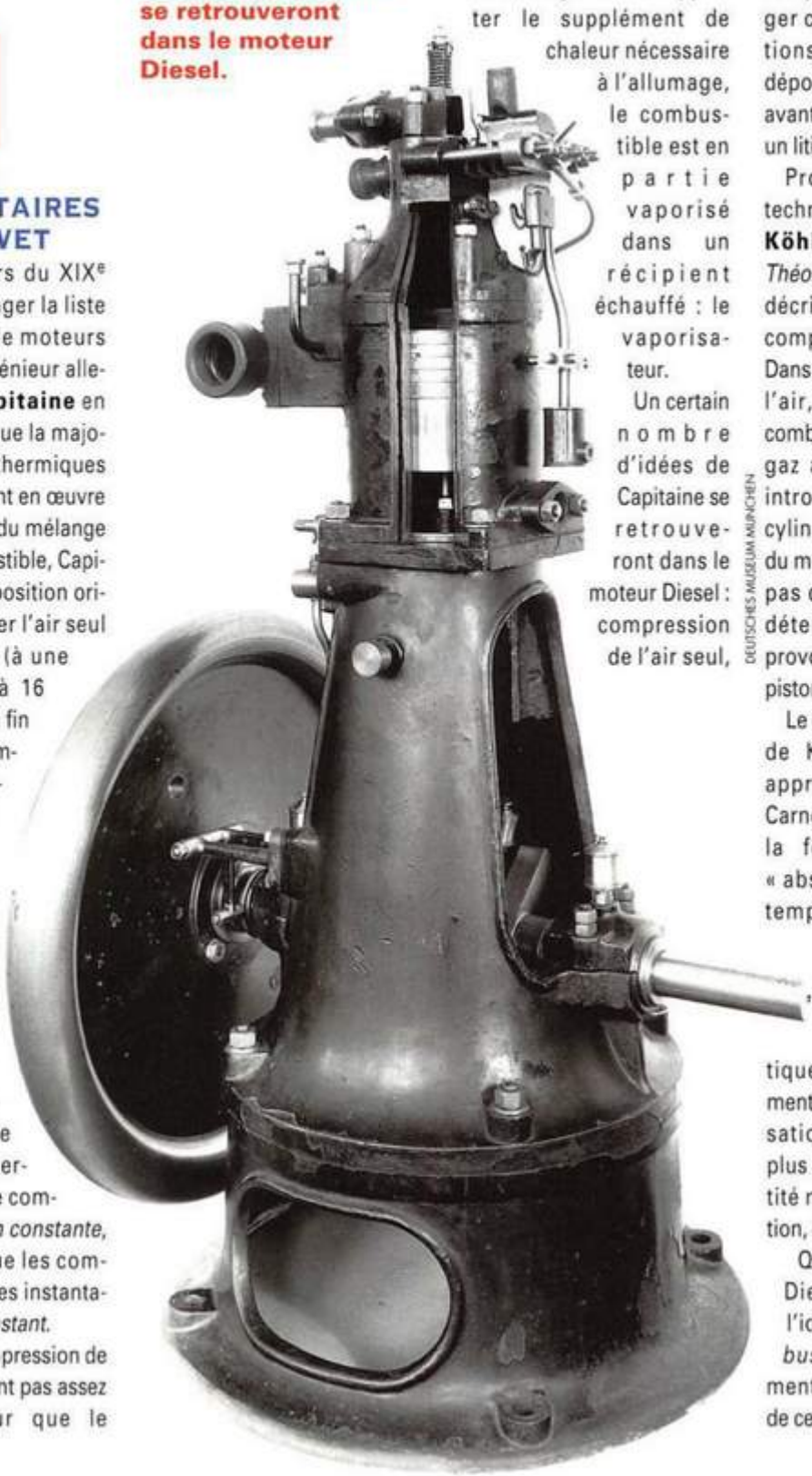
4

Les contestataires du brevet

Le dernier tiers du XIXe siècle voit s'allonger la liste des inventeurs de moteurs thermiques. L'ingénieur allemand **Emile Capitaine** en fait partie. Alors que la majorité des moteurs thermiques de l'époque mettent en œuvre une compression du mélange gazeux air-combustible, Capitaine fait une proposition originale : comprimer l'air seul dans le cylindre (à une pression égale à 16 atmosphères). A la fin de la course de compression, le combustible est ensuite introduit par l'action d'air comprimé, dont la pression est légèrement supérieure (de 1 à 3 atm) à celle régnant dans le cylindre. L'introduction progressive du combustible permet d'obtenir une combustion *à pression constante*, moins brutale que les combustions explosives instantanées *à volume constant*.

A 16 atm, la compression de l'air n'est cependant pas assez importante pour que le mélange atteigne la température d'inflammation du combustible injecté. Pour apporter le supplément de chaleur nécessaire à l'allumage, le combustible est en partie vaporisé dans un récipient échauffé : le vaporisateur.

Un certain nombre d'idées de Capitaine se retrouveront dans le moteur Diesel : compression de l'air seul, insufflation du combustible par l'air comprimé, combustion progressive... Pour protéger certaines de ses inventions, Emile Capitaine a déposé des brevets deux ans avant Diesel : comment éviter un litige ?



Le moteur d'Emile Capitaine : certaines idées de l'inventeur se retrouveront dans le moteur Diesel.

DEUTSCHES MUSEUM MÜNCHEN

Professeur à l'université technique de Cologne, **Otto Köhler** publie en 1887 une *Théorie des moteurs à gaz*. Il y décrit un moteur thermique composé de trois cylindres. Dans le premier, on comprime l'air, dans le deuxième, le combustible gazeux. L'air et le gaz ainsi comprimés sont introduits dans le troisième cylindre où a lieu l'allumage du mélange (Köhler ne précise pas de quelle manière). La détente de l'air échauffé provoque le déplacement du piston.

Le cycle décrit par le moteur de Köhler constitue une approximation du cycle de Carnot. La compression est à la fois isotherme (pour « absorber » l'élévation de température due à la compression, Köhler préconise l'injection d'eau dans le cylindre) et adiabatique. La détente est également isotherme, grâce à l'utilisation d'une quantité d'air plus importante que la quantité nécessaire à la combustion, et adiabatique.

Quelques années avant Diesel, Köhler émet donc l'idée de réaliser une *combustion isotherme*. Comment l'empêcher de profiter de cette antériorité ? ■

Par Emmanuel Chadeau

L'Air du Temps

30 ans de découvertes

Édito

Première puissance industrielle d'Europe et seconde au monde depuis les années 1880, l'Allemagne ne relâche plus son effort scientifique et technique. Celui-ci s'incarne dans la fondation de laboratoires et de centres de recherche, puis dans la course aux prix Nobel, et par le rayonnement de firmes industrielles géantes qui font la part belle aux ingénieurs. Après la métallurgie, la chimie, l'électricité et l'électrotechnique, et enfin l'aéronautique, soutiennent maintenant les progrès de la de science fondamentale et appliquée.

Une galerie de prix Nobel

I. DE SEIVA-APABOR

De 1901 – date de leur première remise – à 1914, 5 prix Nobel de physique et 5 de chimie vont à des Allemands. Parmi les lauréats, on note la présence Wilhelm Röntgen pour la découverte des rayons X (prix Nobel en 1901), Philipp von Lenard pour ses travaux sur les rayons cathodiques (1905), Wilhelm Wien pour les découvertes concernant les lois de la radiation de la chaleur (1911), Max von Laue pour la découverte de la diffraction des rayons X dans les cristaux (1914), Emil Fischer (notre photo) pour ses travaux synthétiques dans les groupes du sucre et de la purine (1902), Adolf von Baeyer pour ses travaux sur les matières colorantes et les combinaisons hydro aromatiques (1905), Eduard Buchner pour la découverte de la fermentation sans cellules, (1907), Wilhelm Ostwald pour ses travaux sur la catalyse, (1909).

Les vertus de l'apprentissage

En Allemagne, la modernisation accélérée n'a pas tué les anciennes habitudes du compagnonnage. Les apprentis ingénieurs et techniciens font de longs stages en atelier, où ils s'initient à quatre métiers manuels. En sens inverse, c'est parmi les compagnons que l'on recrute bon nombre de futurs techniciens et ingénieurs. A cette époque, en France, seules les cinq écoles d'Arts et Métiers offrent une tradition comparable.

La patrie des ingénieurs

Chaque année, l'Allemagne forme plusieurs milliers d'ingénieurs et de techniciens supérieurs dans ses Universités et ses « Hochschule ». Le budget de l'instruction technique supérieure est deux fois et demi plus élevé par habitant qu'en France, trois fois plus qu'en Grande-Bretagne.

I. DE SEIVA - TAPABOR

Le modèle allemand

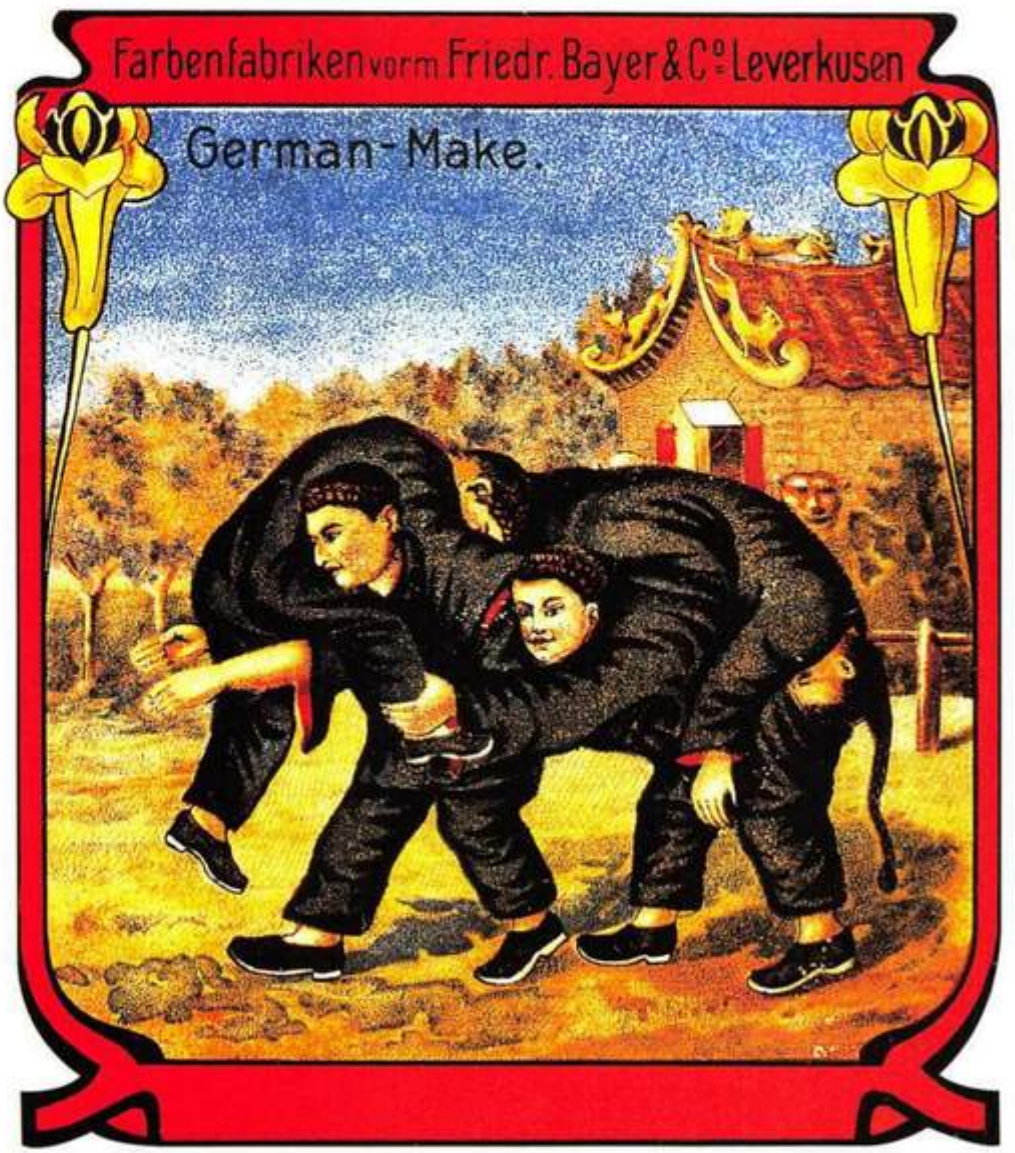
Depuis les années 1880, l'Autriche - Hongrie, longtemps rurale, s'affirme comme l'élève industriel de l'Allemagne. En Bohême, autour de Prague, dans l'agglomération de Budapest, dans les provinces de Graz et de Linz, au cœur de l'Autriche, la métallurgie, la mécanique, le textile sont sous influence. Les banques rhénanes ou prussiennes dominent le paysage financier. Le grand-duché de Luxembourg – que protège l'Empire – des régions entières de Pologne, connaissent le même phénomène.

La poudre anti-douleurs

On connaissait de longue date les propriétés apaisantes des feuilles de saule. Félix Hoffmann en a réalisé la synthèse en 1893 : c'est l'acide acétylsalicylique. En 1899, Bayer lance le produit à l'échelle industrielle sous un nom appelé à durer : Aspirin. Va-t-on vaincre enfin les maux de tête ?

BAYER AG

LES CHAMPIONS DES COLORANTS



En 1901, commence une guerre pour l'indigo entre Bayer et Hoecht, les deux géants de la chimie mondiale. Cette rivalité stimule toute la branche. En 1907, la chimie allemande emploie 265 000 salariés et atteint un chiffre d'affaires supérieur des deux tiers à celui de la chimie américaine. En 1913, plus de 85 % des produits de synthèse fabriqués dans le monde sont allemands.

BAYER AG

L'électricité, fée et servante

Depuis 1890, les moteurs électriques font reculer les machines à vapeur dans l'industrie. En 1902, la presque totalité des chemins de fer urbains sont électrifiés. Deux firmes géantes sont nées de cet essor, Siemens (1866) et AEG (1885), qui sont déjà des multinationales d'envergure européenne. Près de Berlin, la première firme électrotechnique du pays a construit une cité entière, Siemenstadt, vouée à la recherche et à ses applications industrielles, où travaillent 23 000 employés.

Une nouvelle géographie industrielle

Jusqu'au milieu des années 1880, le cœur industriel de l'Allemagne était dans la Ruhr, dans les massifs primaires du Hartz, et au pays de Bade. Désormais, toute la vallée du Rhin, la région de Münich, et Berlin, sont en proie au développement industriel. Autour des noyaux médiévaux des anciennes cités chères aux romantiques, prolifèrent les quartiers neufs qui affichent les symboles de la modernité : tramways, lampadaires, grands magasins, cinémas, docks et dépôts ferroviaires.

COLL. HILDA - EXPLORER ARCHIVES

Première excursion du Zeppelin

En ce beau jour de l'hiver 1900, les riverains du lac de Constance voient s'élever entre les eaux et les Alpes bavaroises un engin exceptionnel : le dirigeable rigide du comte Ferdinand von Zeppelin. Plus lourd que les machines françaises « souples » et « semi-rigides », son armature en alliage léger lui confère davantage de solidité. Sous son enveloppe lisse, les ballonnets de gaz sont séparés dans des compartiments étanches. Le Zeppelin annonce le temps proche où l'aéronavigation sera aussi commode que l'est aujourd'hui la navigation maritime. On parle de le doter de moteurs à essence, et déjà d'en faire un engin militaire.

HARLINGUE - VIOLLET

LL. VIOLLET

LE PÉTROLE DISTANCE LA VAPEUR

Gottlieb Daimler triomphe. Son moteur à pétrole et à 4 temps, qui n'a rencontré que l'indifférence en Allemagne, vient de prouver sa nette supériorité sur le moteur à vapeur. Le 11 juin 1895, a eu lieu, en France, la première course automobile sur longue distance. Les voitures Panhard et Peugeot, équipées du moteur Daimler, ont raflé six des sept premières places. Levassor qui a remporté la course, a bouclé le circuit Paris-Bordeaux-Paris en 48h 47 mn, devançant ainsi de 42h la voiture d'Amédée Bollée, la seule voiture à vapeur à avoir terminé la course.

BOYER VIOLET

LA VIE DU RAIL

LE PREMIER TRAIN SUSPENDU EST NÉ

Vingt ans après la mise en circulation du premier tramway électrique à Lichterfelde, l'Allemagne confirme son avancée technologique en matière de transports. En 1901, une ligne ferroviaire de conception originale est ouverte au trafic. Au-dessus de la rivière Wupper, un train suspendu à un rail unique relie désormais les villes industrielles de Barmen et Elberfeld.

Du vent pour la science

L'université de Göttingen, une des plus cotées du pays, fonde, en ce mois d'octobre 1909, un Institut de mécanique des fluides, le premier au monde. Son originalité : il dispose d'une soufflerie permettant de tester les maquettes de navires, mais aussi d'aéronefs. Son patron n'est autre que Ludwig Prandtl, auteur de la théorie de l'écoulement d'un fluide autour d'un obstacle. Son but : porter l'Allemagne au premier rang d'une discipline en plein essor, l'aéronautique.

Pour la gloire de L'Empire

En 1912, le prince Henri de Prusse, chef de l'aviation militaire, a remporté deux victoires. En amont, c'est la création par le ministère de l'Intérieur d'un Institut de recherche aéronautique à Aix-la-Chapelle. En aval, c'est le vote d'un crédit de 7,2 millions de marks pour monter une vraie flotte d'avions militaires. Entre les deux, naissent des ateliers industriels, comme ceux d'Anthony Fokker, un jeune Hollandais gendre d'un noble prussien. Va-t-on rejoindre la France, terre pionnière de l'aviation ?

J.L. CHARMET

L. DE SÉVA - TAPABOR

« QUEL NUMÉRO DEMANDEZ-VOUS ? »

Il a fallu un peu plus de vingt ans pour que le téléphone, breveté en 1876 par Graham Bell, passe dans les mœurs. En janvier 1881, huit téléphones seulement étaient en service à Berlin. En cette fin d'année 1905, l'Allemagne compte plus de 21 000 réseaux téléphoniques. Supplantant la poste pneumatique, les lignes téléphoniques relient de plus en plus de villes entre elles. Mais aujourd'hui, une autre révolution se prépare : le standard automatique de l'Américain Almon Brown Strowger pourrait bien se substituer un jour à nos "demoiselles des Postes". La firme Siemens & Halske expérimente déjà une installation de téléphone automatique à Hildesheim.

Naissance de l'aérodynamique moderne

Moins de quatre ans après avoir vu voler à Paris Henry Farman sur son Voisin (1908), Theodore Von Karman, un collaborateur de Ludwig Prandtl, jette les bases de l'aérodynamique moderne. Dans un article intitulé : « Les mécanismes de la résistance éprouvés par un corps en mouvement dans un fluide », il décrit comment se forment autour des mobiles aériens des tourbillons d'air (vortex), et explique comment les stabiliser au service de la vitesse.

Comment relier l'art et l'industrie ?

Fondé en 1907 par une douzaine d'artistes et quelques firmes industrielles, le Deutscher Werkbund s'était tracé un objectif : réaliser de la qualité dans la production industrielle. Pour cela, l'ouvrage devait non seulement "s'adapter correctement aux matériaux" mais aussi avoir "une signification artistique". Des ateliers furent ainsi ouverts afin de promouvoir la création industrielle. Des firmes firent appel à des artistes pour redessiner leur production. Aujourd'hui, le Werkbund est partagé entre deux courants : les tenants de la standardisation, menés par Hermann Muthesius, et ceux qui restent attachés à l'artisanat et à l'art décoratif.

Vers une nouvelle architecture

En 1909, s'achève sous la férule de Peter Behrens, à Berlin, la construction de l'usine de turbines de l'A.E.G. Tout, dans cet imposant bâtiment, semble s'orienter vers un strict fonctionnalisme : le dépouillement des formes, le vaste emploi du verre, l'absence totale de décor. Tournant résolument le dos à l'Art nouveau, Behrens s'impose comme le pionnier de l'architecture moderne allemande. Le Jugendstill a-t-il vécu ?

L'ART N'EST PAS ENNEMI DE L'UTILE

Au cours de l'année1900, le comte Harry Kessler confiait la décoration de son appartement à un maître de l'Art nouveau : le Belge Henry Van de Velde. Le résultat est époustouflant et, si le comte devait faire des émules, une petite révolution bouleverserait l'intérieur de nos foyers. Adieu la chambre style "coquillage", le sofa en peluche, les tentures sombres et cossues et les bibelots de toutes sortes. De toute cette confusion émerge une ligne sobre et nette, de la clarté et de l'espace, des meubles qui allient la forme et la fonction, et où l'ornement n'est plus une fin en soi.

L'HISTOIRE

Essayons de nous représenter le processus d'une invention comme une courbe joignant le point où elle n'existe pas encore, à celui où elle prend matériellement place dans la réalité. Une telle « trajectoire » s'infléchirait en divers points cruciaux où plusieurs directions sont possibles. Appelons ces points des décisions. Certaines répondent à la pression de facteurs externes, d'autres à celle de facteurs internes. Il en fallut treize pour que naisse le moteur Diesel.

L. DE SELVA - COLL. GARAGE DE GIVERNY

TREIZE D
POUR UN NOU

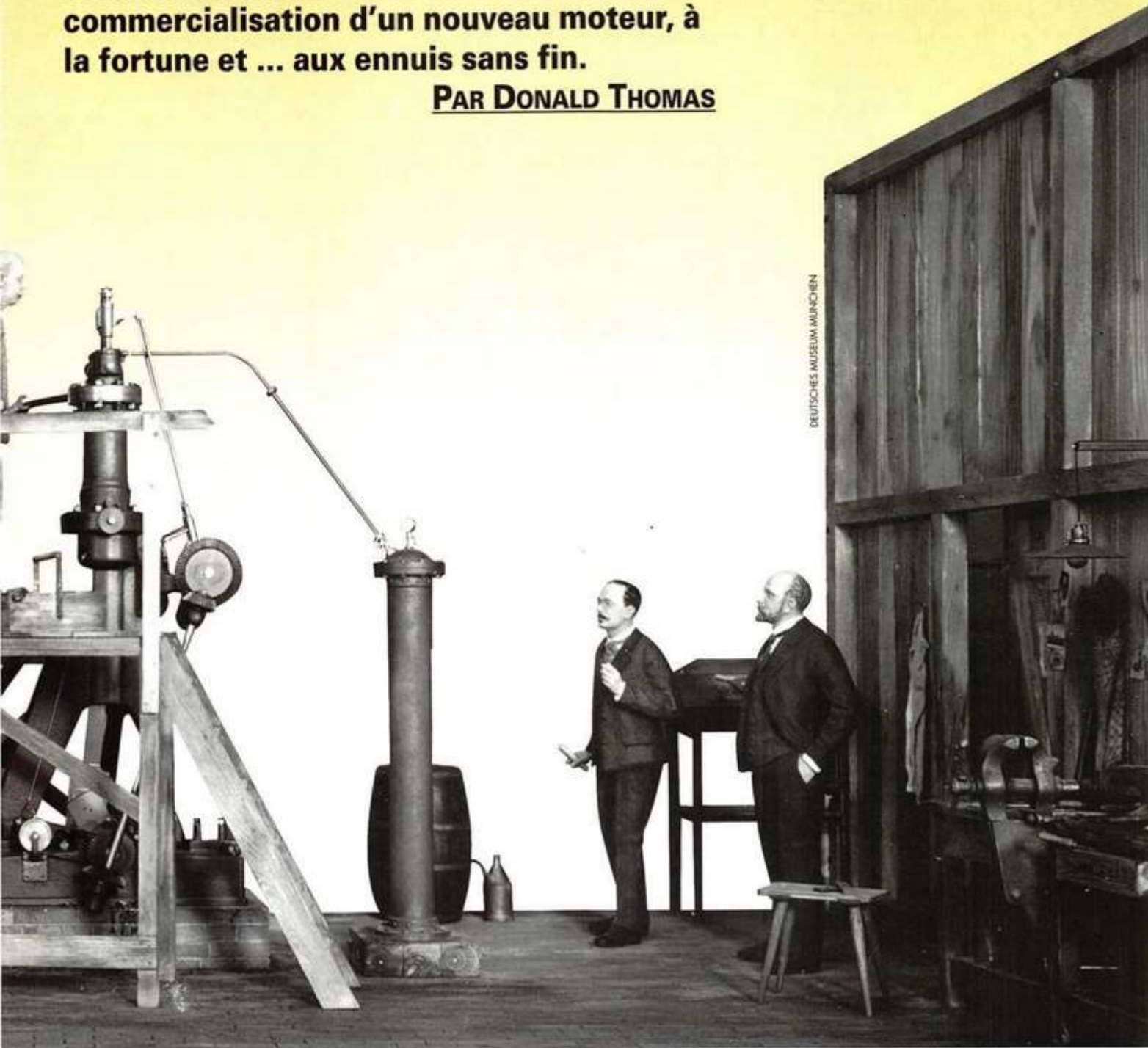
En 1878, Diesel conçoit un rêve : réaliser un moteur doté d'un rendement thermique exceptionnel, aussi proche que possible de l'idéal de Carnot. Au début des années 1890, il entreprend de donner corps à cette idée. Elle se transforme en obsession. Pour

Ce 18 août 1893, le prototype du moteur imaginé par l'ingénieur Diesel est en place pour son premier essai. Nul ne sait encore s'il va fonctionner...

ÉCISIONS
VEAU MOTEUR

le meilleur et pour le pire, elle détermine ses choix sur un parcours, semé d'embûches, qui mène de la théorie à la commercialisation d'un nouveau moteur, à la fortune et ... aux ennuis sans fin.

PAR DONALD THOMAS



DEUTSCHES MUSEUM MÜNCHEN

TREIZE DÉCISIONS POUR UN NOUVEAU MOTEUR

« *Il faut beaucoup désirer pour atteindre quelque but que ce soit... Inventer signifie guider une bonne idée, extirpée d'un large ensemble d'idées erronées, à travers de nombreux échecs et compromis afin de parvenir à une réussite pratique. Pour cette raison, chaque inventeur doit être un optimiste.* » L'auteur de cette phrase parle d'expérience. En l'écrivant, Rudolf Diesel jette un regard nostalgique sur la grande histoire de sa vie : l'invention du moteur qui porte son nom.

De fait, cette histoire constitue une excellente illustration du processus d'invention, de développement et d'innovation. Procédons à notre tour à quelques définitions : l'invention relève d'une stricte démarche intellectuelle, par laquelle un « inventeur » conçoit une idée nouvelle ; le développement convertit cette idée en un modèle pratique ; enfin, l'innovation perfectionne ce modèle et l'introduit sur le marché. Rudolf Diesel lui-même faisait explicitement la distinction entre ces divers concepts : l'idée d'une invention ; sa concrétisation, qui oblige à un compromis entre théorie et réalité ; et sa commercialisation, une longue suite de batailles juridiques et de combats contre les intérêts établis – « *un calvaire, même lorsque l'on a du succès* », a-t-il écrit...

L'invention, le développement et l'innovation du moteur Diesel furent effectivement loin d'être un long fleuve tranquille. D'hypothèses erronées en impasses, Diesel frôla le désastre plus d'une fois. On sait sa tragédie personnelle, survenue au moment où son invention connaissait un succès mondial...

Nous déroulerons cette histoire en identifiant autant que possible, et en assumant le risque de la caricature, les décisions cruciales prises au fil du temps par Diesel et ses associés. Examinant à chaque étape les influences déterminantes, nous les répartirons en facteurs externes ou internes. Les premiers caractérisent toute influence, de nature sociale ou intellectuelle, susceptible de modifier le cours d'un changement technique. Les seconds se réfèrent exclusivement aux améliorations d'ordre « mécanique » apportées à une technologie quelconque, que ce soit par perfectionnement d'éléments déjà existants ou par tâtonnements.

Dans quel contexte Diesel entre-t-il sur la scène industrielle ? A la fin du XIXe siècle, l'Allemagne favorise l'expansion de son réseau d'écoles techniques. Les élèves-ingénieurs y reçoivent une double instruction : l'une théorique, en science, l'autre pratique, en laboratoire. Pour les ingénieurs mécaniciens de l'époque, la machine à vapeur constitue la référence majeure en matière de puissance motrice. Sous l'impulsion de la toute jeune thermodynamique, ces ingénieurs apprennent qu'il leur faut viser un but précis : améliorer le rendement thermique des moteurs. Autrement dit, comment accroître la part de l'énergie thermique, produite par la combustion d'une matière quelconque, qui sera convertie en travail dans le cylindre du moteur ? Chacun a déjà conscience que le rendement thermique d'un moteur à vapeur est, dans le meilleur des cas, inférieur à 10 %. Dès le milieu du siècle, des centaines d'ingénieurs tentent donc de mettre au point une machine plus efficace.

Toutefois, une certaine incompréhension règne alors entre théoriciens et praticiens. Les premiers ne se rendent pas compte à quel point la conception d'un moteur pose de nombreux problèmes pratiques. Quant aux seconds, ils éprouvent quelques difficultés à comprendre les fondements de la thermodynamique qui, désormais, est censée guider leur travail. Ainsi, ils focalisent excessivement leur attention sur le rendement thermique, au détriment des autres types de rendements et, singulièrement, du rendement mécanique (voir article de K. Chatzis).

Selon le propre récit de Diesel, son histoire commence en 1878. Il est alors sur les bancs de l'École technique de Munich et assiste à un cours de thermodynamique. Le professeur Karl Linde décrit un moteur idéal de Carnot : 100 % de la chaleur produite par la combustion y serait convertie en travail ! En comparaison, le rendement d'un moteur à vapeur semble ridicule aux yeux des élèves de Linde, et particulièrement du plus brillant d'entre eux, Rudolf Diesel. L'idée lui vient naturellement : remplacer le moteur à vapeur par un moteur thermique plus rentable, fonctionnant au plus près du fameux cycle de Carnot. Idée banale, dira-t-on... Pas pour Diesel, qui en fait une véritable obsession : « *Le désir de réaliser le processus idéal de Carnot a, dès lors, réglé mon existence* », déclarera-t-il plus tard.

Selon nos critères définis plus haut, c'est donc un facteur externe, la science thermodynamique, qui est à l'origine de la première décision cruciale de cette histoire. De fait, Diesel appartient à une nouvelle génération d'ingénieurs : ayant reçu une solide instruction scientifique, ils sont prêts à explorer un domaine où la théorie est fort en avance sur la pratique. Tel n'était pas le cas un siècle plus tôt : la science de la chaleur fut en effet très en retard sur le développement des machines à vapeur.

Quelque temps après, dans les années 1880, Diesel travaille en France. Il représente la société de machines frigorifiques de son ancien professeur, Linde. Diesel est alors attiré par un mouvement d'idées qui prône, avec un certain succès, la *décentralisation industrielle*. Ce mouvement s'appuie sur une constatation d'évidence : la prolétarisation ne cesse de s'accroître au sein d'entreprises de plus en plus grandes. Certains estiment en outre que, du fait de cette concentration de travailleurs, les idées socialistes s'y propagent trop aisément. Quel est le responsable de ce phénomène inquié-

tant ? Les théoriciens de ce mouvement répondent : le moteur à vapeur...

En effet, plus ils sont de grandes dimensions, plus ils sont rentables. D'où l'explication du gigantisme des industries... Mais, si la technique est la cause des problèmes sociaux, elle doit aussi pouvoir y apporter des solutions. A la fin du XIXe siècle, de nombreux inventeurs tentent ainsi, un peu partout, de trouver une petite source d'énergie efficace. En freinant le phénomène de centralisation industrielle, ne pourrait-elle redonner vie à l'artisanat ? Après la thermodynamique, ce mouvement intellectuel (voir l'article de G. Ribeill et M. de Pracontal) constitue le second facteur externe auquel Diesel est sensible.

Au cours des années 1880, Diesel se lance sur le terrain, déjà fort encombré, de l'invention. Il s'exerce d'abord sur une machine à glace transparente, puis sur un moteur à vapeur d'ammoniac. Il y met toute son énergie, comme il l'écrit à sa femme en 1887 : « *Je pars pour toute la journée, je mange dehors et rentre tard le soir. Après dîner, j'écris mes impressions de la journée. Je ne dors pas bien du tout ; je reste éveillé la moitié de la nuit et rumine mes idées. Si le succès vient finalement, il m'apparaîtra comme le salut après toutes ces années de prison. Je vis en ce moment dans un état d'agitation désespérée.* »

Le succès se dérobe pourtant. Le 18 mars 1888, jour de son anniversaire, Diesel écrit à ses parents : « *J'ai maintenant trente ans. Il me semble que je suis un vieil homme, fondamentalement triste d'avoir tant travaillé pour accomplir si peu. D'un autre côté, j'ai l'impression que mon talent est en plein développement ; ainsi, je n'ai pas abandonné tout espoir.* »

Au courant de l'année 1889, Diesel prend une deuxième décision cruciale : il abandonne ses recherches sur le moteur à ammoniac. Il quitte Paris pour Berlin et songe à élaborer une théorie d'un moteur radicalement nouveau. Son échec précédent n'est pas totalement inutile : « *Les germes de mon moteur à ammoniac commencent à pousser, et il n'est pas impossible que la plante grandisse plus vite qu'on ne le pense* », confie-t-il à sa femme. Il décrira plus tard le cheminement intellectuel qui, à partir de l'idée de Carnot et de son travail concret sur le moteur à ammoniac, l'a amené à son invention : « *La théorie et la pratique m'avaient déjà mené sur le chemin de la surchauffe de la vapeur. Mes expériences avec le moteur à ammoniac que j'avais fabriqué me firent voir, d'une manière surprenante, les avantages de la surchauffe. Je dérivai une théorie complète d'un moteur à vapeur d'ammoniac très surchauffée et découvris mathématiquement ses avantages significatifs sur le traditionnel moteur à vapeur.* » Quelles sont les conséquences d'une surchauffe, c'est-à-dire d'une température élevée de la vapeur ? « *Ce moteur se distinguait par ses extraordinaires petites dimensions, ce qui signifiait* ***que non seulement de hautes températures, mais aussi de très hautes pressions, devaient être utilisées pour tirer l'avantage maximal du processus.*** *Afin de ne pas m'égarer, j'effectuai aussi des calculs sur des moteurs qui utiliseraient de la vapeur d'eau très surchauffée. Là aussi, je vis la nécessité d'utiliser des hautes pressions, parce que seule une grande différence de pression durant la phase de détente permet d'utiliser efficacement une grande différence de température.* »

MAN WERKARCHIV AUGSBURG

Rudolf Diesel (1890)

Ces lignes sont extraites de l'appendice, non publié, de l'ouvrage intitulé : *Théorie et Construction d'un Moteur Thermique Rationnel et à Fort Rendement*. Ainsi, selon Diesel, ses idées sont nées exclusivement de ses propres recherches. Elles sont issues de ses expériences infructueuses sur le moteur à ammoniac et ne sont, en aucun cas, basées sur l'étude de moteurs existants. Bien que ces affirmations soient discutables, nul ne doute de la principale motivation de Diesel : approcher, d'aussi près que possible, le cycle de Carnot. Car Diesel est convaincu qu'en théorie, tout peut être mathématiquement calculé : il doit être possible d'élaborer un processus rationnel de combustion qui convertisse le maximum de chaleur en travail. « *Aujourd'hui, on ne se rend pas compte du rôle que le principe de Carnot a joué pour notre génération.* [...] *On en avait fait le credo de la thermodynamique ; le mettre en doute était synonyme de blasphème ou d'hérésie, propre à vous brûler sur un bûcher* », écrira-t-il ultérieurement pour sa défense.

Mais qu'avait donc écrit Carnot ? Dans ses *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* (1824), il avait établi un parallèle entre les machines thermiques et les machines hydrauliques. Comme l'eau fait tourner la roue d'un moulin, la chaleur est un fluide qui s'écoule entre la chaudière et le condenseur. Or, une chute d'eau fournit davantage de puissance lorsque la hauteur de la chute est plus grande. En poursuivant l'analogie, il s'ensuit que, dans une machine thermique, plus l'écart de température

entre la chaudière et le condenseur est important, plus une machine est puissante. L'analogie se révélera erronée, puisqu'elle postule que la chaleur est un fluide qui se conserve. Après les expériences de James Joule (1850)[1], puis les théories de Thomson et Clausius, un tel discours n'est plus tenable. Néanmoins, le raisonnement de Carnot conserve sa pertinence.

Il décrit un cycle idéal, que l'on appellera plus tard du nom de son inventeur, dans lequel l'intégralité de la chaleur produite par la combustion est convertie en travail. Dans son fonctionnement idéal, la machine est réversible : le travail peut à son tour être reconverti en chaleur, celle-ci retrouvant sa température initiale. La clé du succès réside dans ce principe énoncé par Carnot : « *La condition nécessaire du maximum [de rendement] est qu'il ne se fasse, dans les corps employés à réaliser la puissance motrice de la chaleur, aucun changement de température qui ne soit lié à un changement de volume* [2] ».

Nous savons maintenant – et Diesel aurait dû en être davantage conscient – qu'un tel cycle parfait est impossible à réaliser. Il n'est que trop évident, dans des machines réelles, que le frottement et le rayonnement entraînent toujours une déperdition de chaleur, comme l'indique le second principe de la thermodynamique. Mais cela était, semble-t-il, de l'ordre de l'accessoire, hors du champ des préoccupations de Diesel. Ses professeurs ne l'avaient certainement pas encouragé à lire le texte original de Carnot. On y trouve pourtant cette conclusion destinée aux futurs inventeurs : « ***L'économie du combustible n'est qu'une des conditions à remplir par les machines à feu ;*** *dans beaucoup de circonstances,* ***elle n'est que secondaire****, elle doit céder le pas à la sûreté, à la solidité, à la durée de la machine, au peu de place qu'il faut lui faire occuper, au peu de frais de son établissement, etc.* » Si Diesel avait lu ces lignes, se serait-il lancé à corps perdu dans cette histoire ?

Quoi qu'il en soit, les réflexions de Diesel s'enchaînent : « *Le désir de remplacer la vapeur d'ammoniac par quelque chose de moins cher et de plus facile à manipuler m'amena à l'utilisation de l'air. Les recherches théoriques entraînèrent le même résultat : ici aussi, une différence de pression, qui peut théoriquement être décrite complètement, est nécessaire pour utiliser une grande différence de température.* ***Les deux conditions sont inséparables.*** » La substance motrice sera donc l'air, fortement comprimé pour atteindre une haute température. Puis Diesel parvient « *après un long détour, à l'idée qui est depuis longtemps à l'œuvre dans les moteurs à gaz et à air chaud :* ***la combustion dans le cylindre lui-même****. Avec de hautes températures, cependant, il n'est pas possible de profiter avantageusement du processus de combustion normal. J'ai donc eu l'idée de réaliser la combustion dans l'air hautement comprimé lui-même.* »

Ainsi, l'air sera également *agent de combustion* à l'intérieur du cylindre. Au terme de sa forte compression (au départ, Diesel imagine une compression exceptionnellement élevée : 250 atmosphères), la température de l'air sera alors nettement supérieure à la température d'inflammation du combustible. L'air sera comprimé seul, puis le combustible sera pulvérisé et injecté dans le cylindre au point maximum de la compression (point mort haut) : il s'enflammera alors spontanément. Bien que cela soit considéré aujourd'hui comme la principale caractéristique du moteur diesel, ce n'était, dans l'esprit de son inventeur, que l'un des nombreux attributs de sa théorie, et certainement pas le plus important...

Diesel trouve enfin un biais pour rapprocher son moteur du cycle de Carnot, en particulier pour qu'il accomplisse une phase isotherme. Le combustible, introduit dans le cylindre au point maximum de la compression, s'enflammerait spontanément, mais la température de l'air ne s'élèverait pas ! Comment est-ce possible ? Diesel propose un mélange air-combustible dans des proportions de 9 pour 1. En d'autres termes, il s'agit d'utiliser beaucoup plus d'air qu'il n'en est requis pour la combustion complète d'une quantité donnée de combustible. De cette manière, la chaleur produite sera utilisée pour détendre l'importante masse d'air résiduelle... Selon l'expression de l'historien Lynwood Bryant, l'idée principale de Diesel est d'avoir trouvé « *un moyen de brûler du combustible dans un moteur sans élever la température.* »

Selon les calculs de Diesel, le rendement thermique du futur moteur serait de presque 73 % : un chiffre astronomique, propre à déclencher les rêves les plus fous dans le monde industriel et commercial...

Bien que Diesel revendique l'originalité de ses idées, il est clair qu'un certain nombre d'entre elles sont déjà bien connues. En 1887, Otto Köhler, professeur de l'Université technique de Cologne, avait proposé un moteur très semblable à celui de Diesel. Une seule différence les sépare : celui de Köhler ne fait pas appel à l'inflammation spontanée par compression. Les idées de Köhler sont d'ailleurs énoncées dans le livre de Franz Grashof, *Theorie der Kraftmaschinen* (1890), à l'époque un ouvrage de référence en la matière. D'autres inventeurs, comme l'Anglais Herbert Akroyd Stuart, travaillent sur des moteurs qui mettent en œuvre soit la pulvérisation du combustible, soit la compression élevée, ou encore l'inflammation « spontanée » par contact avec des surfaces chaudes.

Il est difficile d'imaginer que Diesel ait pu ignorer tous ces développe-

1 – Voir *Les Cahiers de Science et Vie* n° 29.
2 – Voir la réédition du petit livre de Carnot par Jacques Gabay, 1990.

SCIENCE & SOCIETY P. L. - THE SCIENCE MUSEUM, LONDON

Herbert Akroyd Stuart

Gustav Zeuner

PHOTOS DEUTSCHES MUSEUM MÜNCHEN

Eugen Langen

ments. Si tel est le cas, il est alors coupable de n'avoir pas minutieusement cherché d'antécédents à ses idées. Sans doute est-il aussi trop théorique. Son manque d'information en matière de construction de moteurs l'empêche d'appréhender les problèmes pratiques que posent ses idées. En revanche, et c'est à mettre à son crédit, on peut affirmer que Diesel est le premier à rassembler toutes ces idées dans une théorie globale et, surtout, à entreprendre les révisions nécessaires pour mener à bien son projet.

En hiver 1892, Diesel prend une troisième décision cruciale. Il soumet son manuscrit à son ancien professeur, et employeur du moment, Karl Linde : *« J'ai le grand plaisir de vous annoncer que j'ai découvert un moteur qui n'utilise théoriquement qu'un dixième du charbon que nos meilleurs moteurs à vapeur consomment. [...]* ***Ce résultat n'est pas une hypothèse ou un espoir. Il peut être mathématiquement prouvé*** *de telle façon qu'aucun doute n'existe plus sur sa faisabilité. Sur le plan pratique,* ***la construction du moteur n'offre aucune difficulté qui vaille la peine d'être mentionnée,*** *puisqu'elle ne fait appel à aucune technique qui soit fondamentalement nouvelle. Si l'on ne parvenait qu'à atteindre 60 à 70 % du rendement théorique, le moteur utiliserait quand même seulement un sixième ou un septième du combustible consommé dans les meilleurs moteurs. »*

Linde envoie à son tour le manuscrit au professeur Moritz Schröter de l'École technique de Munich. Dans les réponses qu'ils adressent à Diesel, ces deux hommes ne tarissent pas d'éloges sur sa théorie. Toutefois, Linde et Schröter y mentionnent aussi quelques difficultés pratiques quant à sa réalisation. Schröter ne tardera pas à dépasser ses réticences initiales et deviendra bientôt l'un des plus fervents partisans de Diesel. Comme l'éminent expert en thermodynamique, Gustav Zeuner, qui prend connaissance de la théorie de Diesel en 1893... Il est difficile de savoir dans quelle mesure ces deux hommes ont examiné en détail les idées de Diesel. En tout cas, ils sont certainement les représentants des deux principaux facteurs externes qui ont influencé Diesel. Car tous deux sont animés par le désir de trouver des moteurs thermiquement plus rentables et Schröter, de son côté, défend la théorie de la décentralisation industrielle.

L'avis favorable de tels universitaires réputés servira à Diesel de levier afin d'obtenir le soutien, tant espéré, de l'industrie. En revanche, plusieurs praticiens demeureront très perplexes et refuseront d'apporter à Diesel une aide quelconque. Ainsi, Eugen Langen qui, dans les années 1870, avait aidé Nicholas August Otto à développer le moteur à combustion interne à quatre temps, écrira à Diesel : *« J'espère que je ne vous fâcherai pas si, avec mon expérience pratique, j'exprime les plus grandes réserves quant à vos capacités de réaliser ces idées. Quasiment personne n'a l'expérience de moteurs fonctionnant à 300 tours, avec des pressions de 200 atmosphères et qui, dans un temps à peine mesurable, admettent et brûlent des combustibles solides. Je ne crois pas me tromper en supposant que de tels essais entraîneront une déception considérable. »* Le sens de l'intuition de Langen, qui avait permis la fortune des usines Deutz deux décennies plus tôt, lui fait cette fois-ci défaut...

En mars 1892, Diesel entre en pourparlers avec la *Compagnie de construction de machines d'Augsburg*. Il connaît

Législation allemande sur les brevets

En janvier 1871, sous Bismarck, a lieu l'unification de l'Allemagne. De nouvelles lois remplacent les lois propres aux différents « États ». C'est ainsi qu'en 1877 entre en vigueur la première loi allemande sur les brevets. Votée juste avant l'ère de protectionnisme que va connaître l'Allemagne, cette loi arrive à une époque où la complexité technologique s'accroît. La réalisation d'une invention nécessite désormais des apports en capital et en équipements de grands industriels et investisseurs.

Mais la loi sur les brevets s'avère difficile à mettre en œuvre. D'une part, il est difficile de circonscrire le champ d'application d'un brevet. D'autre part, les procédures d'invalidation sont déficientes, et la définition de ce que l'on peut considérer comme une invention manque de clarté. Une révision de la loi s'impose. Elle est réalisée en 1891. Il ressort de la nouvelle formule quelques points essentiels :

– On ne peut désormais accorder un brevet qu'à une invention débouchant sur des applications industrielles (l'inventeur doit expliquer comment passer de l'idée au futur « objet » réel).

– Une invention mettant en œuvre un principe déjà décrit dans un document écrit au cours des cent dernières années n'est pas valide.

– Un inventeur conserve le monopole d'exploitation de son produit – production et vente – pendant 15 ans.

– Les procédures d'invalidation d'un brevet (par exemple pour « absence de nouveauté ») ne peuvent être mises en œuvre que pendant cinq ans après son attribution.

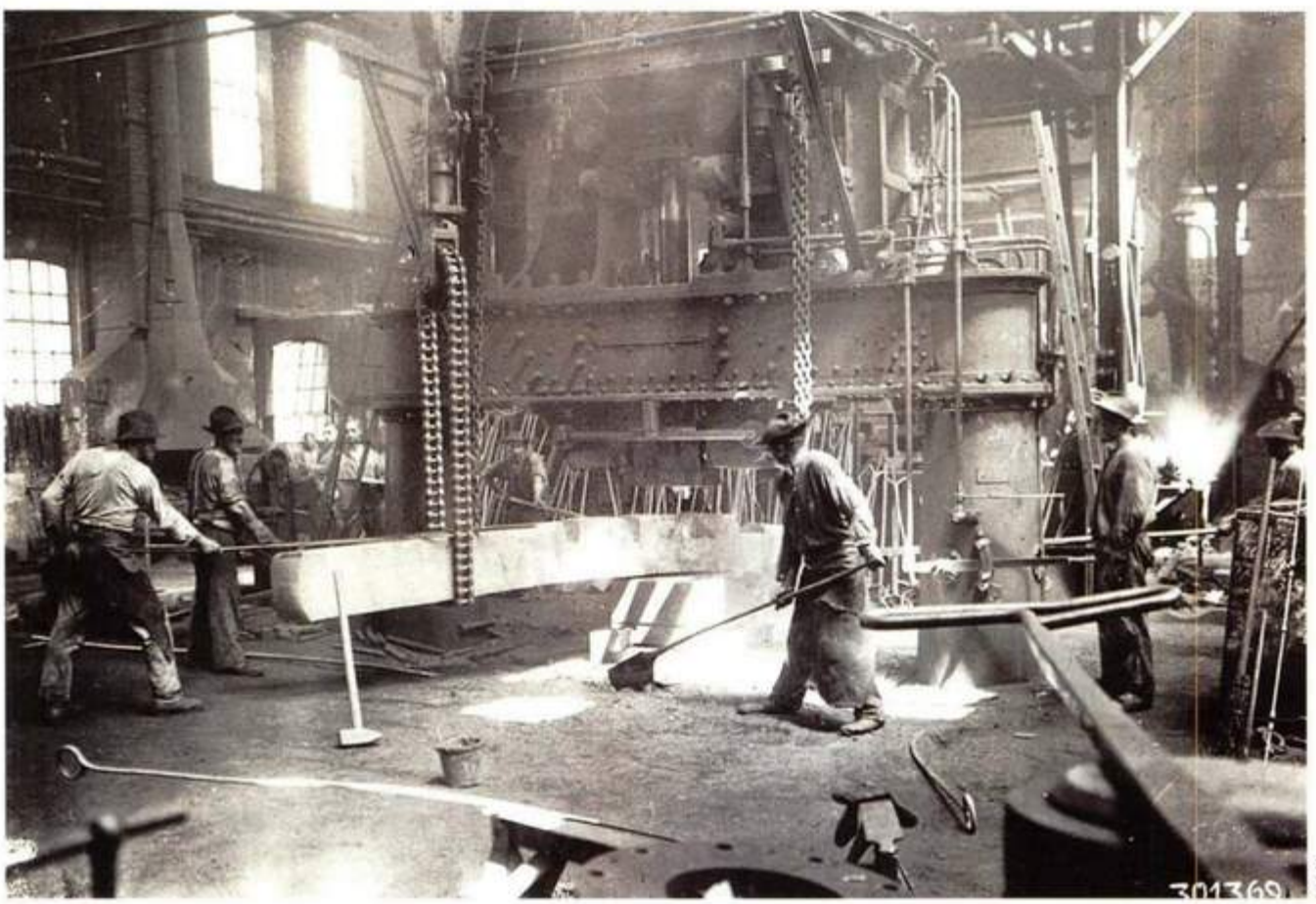
– L'office chargé d'examiner la demande de brevet exige des taxes annuelles. Leur montant s'élève à 50 marks la première année, puis augmente de 50 marks chaque année, pendant les quinze ans que dure l'exclusivité du brevet..

K. Chatzis

En 1893, Diesel signe un contrat avec la Compagnie de construction de machines d'Augsburg. Elle deviendra, après sa fusion avec l'entreprise de Nüremberg, la plus grosse entreprise mécanique en Allemagne : la MAN. (Ci-dessous, ancienne forge)

déjà son propriétaire, Heinrich Buz, qui entretient des relations avec la société de Karl Linde. La première réaction de Buz est négative. Comme Langen, ses conseillers techniques s'effraient des pressions excessivement élevées (250 atmosphères) incluses dans le projet de Diesel.

L'inventeur a alors toutes les raisons d'être accablé. En repoussant ses avances, Augsburg vient parachever une série d'échecs. D'une part, Karl Linde, après avoir fait l'éloge de ses idées, a finalement refusé toute coopération. D'autre part, l'Office des brevets allemand vient de rejeter sa première demande. Mais Diesel s'obstine. Il écrit de nouveau à Buz pour lui faire part de diverses propositions techniques : la pression dans le cylindre pourrait être abaissée à 44 atmosphères et la poussière de charbon, qu'il avait proposée à l'origine, pour-



M.A.N.

PATENT-URKUNDE

KAISERLICHES PATENTAMT.

M.A.N. WERKARCHIV AUGSBURG

Le brevet est accordé à Diesel en 1893. La description de l'invention amalgame des concepts dont l'un, la combustion isotherme, se révélera irréalisable.

rait être remplacée par un combustible liquide. Enfin, Diesel affirme de manière péremptoire que son invention va révolutionner le monde des moteurs : à terme, elle supplantera le moteur à vapeur ! Sachant que les principaux produits de la Compagnie Augsburg sont précisément des moteurs à vapeur, Diesel espère que ce dernier argument pèsera de tout son poids. Si Buz est convaincu que son moteur est un dangereux rival potentiel pour ses produits, alors il souhaitera être le premier à participer à son développement. Diesel a vu juste. En avril 1892, Augsburg fait volte-face. Avec quelques réserves, la Compagnie accepte d'essayer le moteur. Le contrat, en bonne et due forme, ne sera toutefois signé qu'en février 1893.

En janvier 1893, c'est auprès de la *Compagnie Krupp* que Diesel cherche un second soutien. Les bons offices d'Augsburg lui sont utiles, mais il sait aussi faire preuve de ruse. Il va même jusqu'au mensonge en prétendant que d'autres compagnies sont prêtes à lui accorder un soutien. Cette stratégie réussit. Diesel signera un contrat avec Krupp en avril 1893. Il prévoit que l'industriel versera un salaire annuel à l'inventeur pour qu'il mène ses recherches à plein temps. Krupp et Augsburg se partageront les droits de licence pour l'Allemagne, Diesel gardant toute liberté pour négocier des licences avec des sociétés étrangères.

Diesel gagne ainsi le soutien des deux plus importantes entreprises industrielles allemandes. Ce succès est dû, en majeure partie, à ses puissantes capacités personnelles de persuasion. Mais on peut aussi y déceler une quatrième décision cruciale, où se mêlent pragmatisme et habileté : prenant en considération des facteurs techniques internes, Diesel fait des concessions opportunes quant aux possibilités de son moteur, et, en présentant son invention comme un progrès révolutionnaire sur le moteur à vapeur, il réussit à instiller le doute chez un entrepreneur avisé.

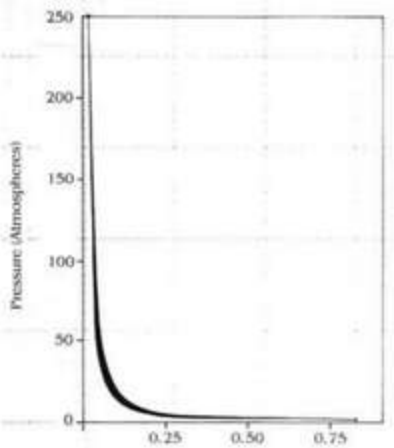
La cinquième décision cruciale doit d'ailleurs être mise au crédit de Heinrich Buz. Alors que l'Allemagne vit une période de récession économique, il parie sur une technique nouvelle, totalement inexpérimentée. Comme l'attestent certains documents, il suit le conseil du département des moteurs à vapeur de la Compagnie Augsburg qui, après une première hésitation, lui recommande en effet de tester les projets de Diesel. Des facteurs externes et internes ont convaincu l'industriel. D'un côté, Buz nourrit le désir d'être au premier rang d'une nouvelle technique qui pourrait assurer l'avenir économique de son entreprise ; de l'autre, il est persuadé que ce moteur peut être construit avec le savoir-faire technologique de l'époque. A ce moment-là, Diesel peut remercier la chance. Ni Augsburg, ni Krupp n'ont, dans leurs rangs, des experts en construction de moteurs à combustion interne. Si tel avait été le cas, ceux-ci n'auraient-ils pas dramatisé les difficultés de réalisation de son moteur ? N'auraient-ils pas réagi comme Langen ? Heureusement, le mariage de l'ignorance – relative – et de l'optimisme – absolu – est conclu...

Depuis février 1892, Diesel négociait avec l'Office des brevets allemand. Bon nombre de ses projets ont d'abord été rejetés. Selon l'Office, aucun n'indique comment Diesel entend mettre ses prétentions en pratique dans un moteur. L'Office lui suggère donc un énoncé différent. Mais cette reformulation amalgame, en une seule affirmation, des concepts réalisables (hautes pressions et inflammation spontanée) et des concepts qui, nous allons le voir, sont irréalisables (combustion isotherme). Cependant, Diesel accepte ce nouveau libellé. A l'origine de cette sixième décision cruciale, deux facteurs externes : d'une part, Diesel reste convaincu que sa machine est capable de s'approcher du cycle de Carnot ; d'autre part, les examinateurs du brevet – comme tous les experts de l'époque – n'ont qu'une faible connaissance des phénomènes qui, lors du processus de combustion, se déroulent dans un cylindre.

Le brevet, finalement délivré sous le n°67207, prend effet en février 1893. Mais la décision d'adopter la formulation globale de l'Office porte en germe de graves conséquences. Lorsqu'il apparaîtra que la réalisation concrète du moteur se sera fort éloignée de la description incluse dans le brevet, les marges de manœuvre face à des contestations en justice seront réduites.

A ce moment, Diesel a peut-être déjà conscience que sa théorie recèle plusieurs difficultés majeures. Quoi qu'il en soit, les remarques critiques que lui adresse publiquement Otto Köhler en 1893 les font clairement apparaître.

Elles sont au nombre de trois : 1/la taille d'un cylindre, dans lequel s'opérerait une combustion isotherme,



DR

Dans un livre publié en 1893, Diesel décrit le cycle théorique d'un moteur de très haute pression (250 atm !). Le diagramme pression-volume d'air est pour le moins déroutant : la surface comprise entre les deux courbes est très réduite. Autrement dit, le travail utile que pourrait produire une telle machine est pratiquement nul. Diesel pouvait-il l'ignorer ?

serait totalement démesurée ; 2/les hautes pressions, requises par la théorie de Diesel, entraîneraient, à cause de frottements importants, des pertes considérables dans le rendement mécanique ; 3/dans le cylindre, le volume excessif d'air, comparé à celui du combustible, ne peut permettre au moteur de développer la puissance nécessaire à son fonctionnement.

A la vérité, comment Diesel a-t-il pu passer à côté de ce dernier point ? Il a lui-même dessiné un diagramme pression-volume qui le met en évidence. On sait que, dans un tel schéma (voir l'article K. Chatzis), la surface entre les courbes décrivant le cycle du moteur représente le travail produit. Or, dans le diagramme du moteur théorique de Diesel, cette surface est ridiculement petite. En clair, son moteur a peut-être un rendement thermique extraordinaire, mais il ne peut fournir qu'un travail utile très faible. Dans la pratique, on peut même craindre qu'il soit nul ! Le professeur Schröter en avait averti Diesel dans une lettre privée dès mai 1892. Mais l'inventeur est resté obstinément sourd à ces remarques. A tel point qu'il n'a pas hésité à inclure ce diagramme déroutant, sans l'accompagner de véritables commentaires, dans son livre publié en 1893...

M.A.N. WERKARCHIV AUGSBURG

Comment traduire ses idées dans un moteur qui fonctionne ? Dans un manuscrit qui ne sera jamais publié, Diesel parvient à la conclusion qu'il doit renoncer à la combustion isotherme.

Entre mai et novembre 1893, Diesel se résout néanmoins à modifier ses idées. Née des critiques externes, sa réflexion s'enracine dans une seule question : comment traduire sa théorie dans un moteur qui fonctionne réellement ? Il noircit plus de deux cents feuillets, au sein desquels on peut notamment lire : « *L'agrandissement de l'aire du diagramme pression-volume, pour un seul et même cylindre, est hautement désirable.* » La critique de Köhler aurait-elle fini par toucher juste ?

La conclusion, radicale, résume la septième décision cruciale de Diesel : « *1/la combustion isotherme est complètement exclue ; 2/la combustion à pression constante est le seul choix.* » Peut-on être plus clair ? Pourtant, Diesel ne rend pas publique cette nouvelle thèse. Un facteur externe détermine ce qu'on peut considérer comme une nouvelle décision cruciale (la huitième). En effet, la validité de son brevet est en jeu et il risque trop gros : la perte de ses soutiens financiers et industriels. Son silence est compréhensible, mais il prête le flanc à de nombreuses critiques qui ne tarderont pas à s'exprimer. Mais comment faire autrement ? Ne fallait-il pas avancer, coûte que coûte ?

Outre cet abandon de la combustion isotherme, Diesel prend aussi conscience de deux exigences : d'une part, il lui faudra utiliser beaucoup plus de combustible que prévu et, d'autre part, après la combustion, l'élévation des températures sera telle que son moteur devra être refroidi. En résumé, quelles sont donc les caractéristiques originales que conserve Diesel ? Principalement, les hautes pressions, qu'il limite cependant à 30-40 atmosphères, et l'inflammation spontanée par compression.

De l'été 1893 à l'hiver 1897, se déroule la seconde période majeure de l'histoire du moteur Diesel : celle du développement. Durant cette période, les facteurs internes prédominent car la théorie doit composer avec la réalité, c'est-à-dire l'état de l'art en matière de construction mécanique à la fin du XIXe siècle. Diesel espérait que ce processus de développement serait rapide puisque, selon lui, il ne devait « *faire appel à aucune technique qui soit fondamentalement nouvelle.* » En fait, il s'étalera sur quatre ans... A un moment, Krupp menace même de dénoncer son contrat. Sans le soutien inconditionnel de Buz, les efforts de Diesel auraient bien pu échouer.

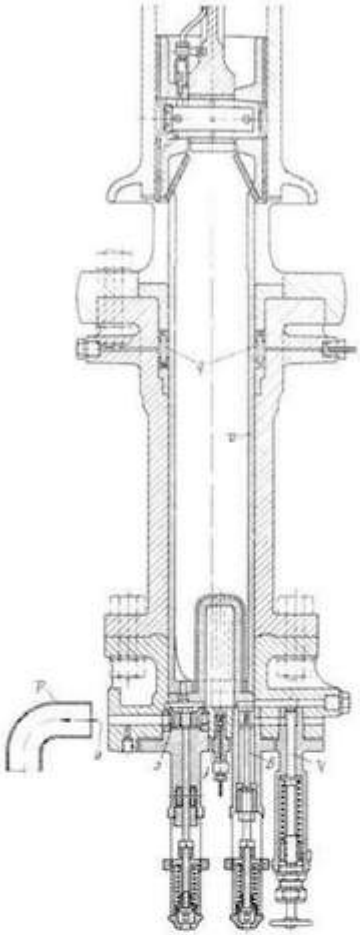
La neuvième décision cruciale dans l'histoire du moteur Diesel appartient à la Compagnie Augsburg. Elle insiste pour tenir un rôle prépondérant dans la réalisation du premier moteur. Tout au long de l'année précédant les premiers essais, Diesel et la Compagnie échangent dessins et projets. Mais des divergences apparaissent. Augsburg insiste pour tester un moteur à pétrole en forme de A, à un seul cylindre. Diesel, lui, propose d'expérimenter un moteur à deux cylindres, d'une plus grande

puissance. Il souhaite aussi évaluer les capacités du charbon pulvérulent en tant que combustible potentiel. Mais la Compagnie refuse les deux propositions de l'ingénieur. S'appuyant sur les technologies existantes, elle force un développement conventionnel, celui d'un moteur stationnaire, lourd, brûlant du pétrole. Au sein du département des moteurs à vapeur d'Augsburg, Diesel trouve peu de soutien. Il ne peut non plus compter sur ses assistants, des mécaniciens issus du département frigorifique. En fait, il faudra attendre l'arrivée d'Imanuel Lauster, début 1896, pour que le projet Diesel compte un ingénieur en combustion interne compétent dans ses rangs.

DEUTSCHES MUSEUM, MUNICHEN

Imanuel Lauster

Alors que les essais débutent, deux séries de problèmes émergent. Tout d'abord, les hautes pressions et les températures élevées générées par le moteur provoquent les fuites des soupapes, des joints et des cylindres, ainsi que l'usure rapide des pièces. Sur ces différents points, Diesel et Augsburg disposent du savoir-faire traditionnel de l'industrie de construction mécanique, auquel ils peuvent faire appel pour trouver des solutions.

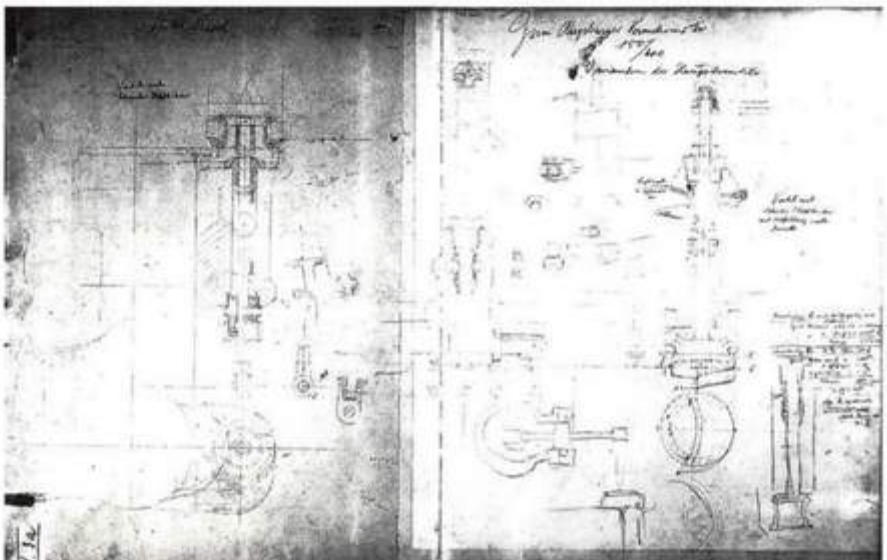


PHOTOS M.A.N. WERKARCHIV AUGSBURG

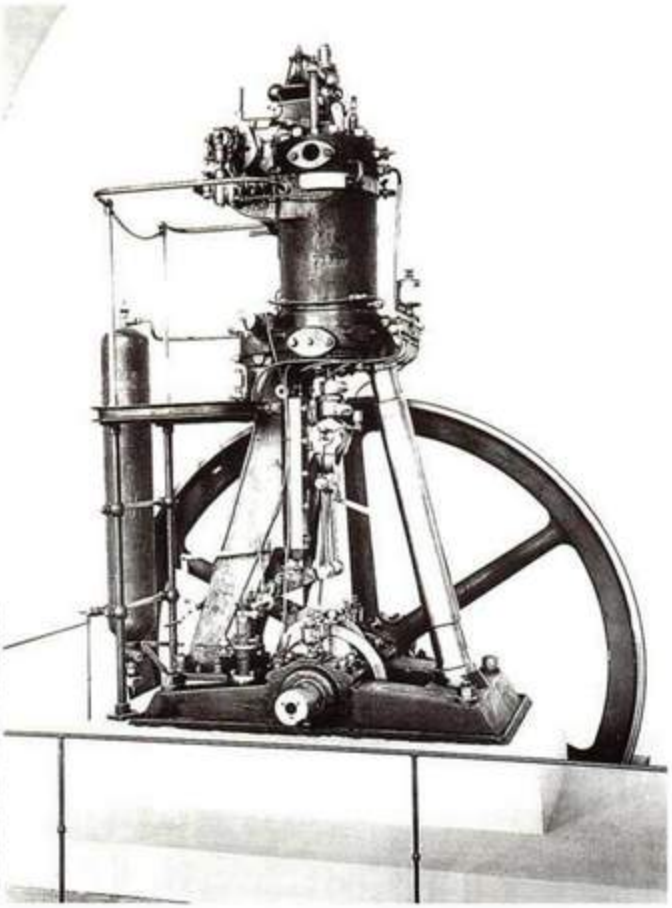
Après de multiples tâtonnements, le premier prototype est enfin construit et testé en août 1893 : il ne délivre aucune puissance. Ci-dessous, dessins de la main de Diesel.

En revanche, la seconde série de problèmes est, contrairement aux dires de Diesel, totalement nouvelle. Quelle taille doit avoir la chambre de combustion ? Quel est le combustible idéal ? Comment le pulvériser ? Quelle doit être la juste proportion du mélange air-combustible ? Là, Diesel et Augsburg opèrent en aveugles. Seules des expériences minutieuses peuvent apporter des réponses. A plusieurs reprises, Diesel s'engage dans des impasses et perd du temps. Il essaie plusieurs carburateurs et divers combustibles. Il va même jusqu'à mettre en œuvre certains systèmes d'allumage. De fait, Diesel est prêt à tout, même à abandonner le principe de l'inflammation spontanée par compression...

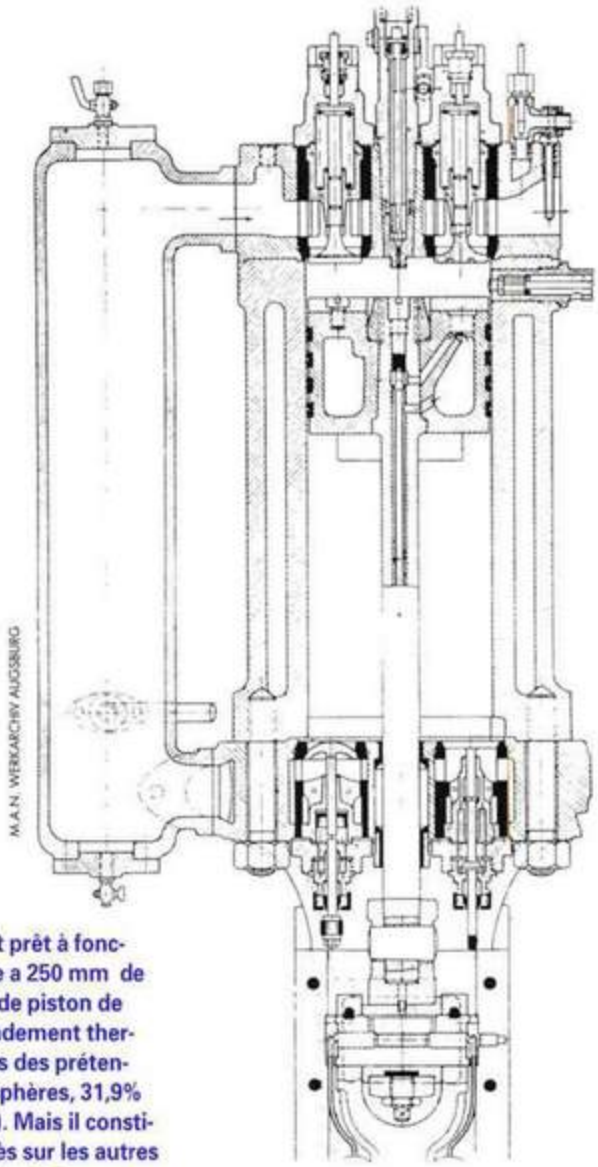
Entre 1893 et 1897, trois moteurs différents sont construits. Le 18 août 1893, Diesel écrit à sa femme à propos du premier prototype : « *Le moteur a aujourd'hui fait son premier tour, un seul, mais le principe est prouvé.* » En fait, le moteur ne délivre aucune puissance. Il faut le reconstruire. Cela prend six mois. La principale amélioration consiste à utiliser un compresseur d'air pour aider à l'injection du combustible dans le cylindre. Bien que la taille et le poids du moteur s'en trouvent accrus, ce compresseur s'avérera nécessaire jusqu'au développement,



M.A.N. WERKARCHIV AUGSBURG



HISTORISCHES ARCHIV M.A.N. AG. AUGSBURG



M.A.N. WERKARCHIV AUGSBURG

après la Première Guerre mondiale, d'un système d'injection directe du combustible.

Tout au long de l'année 1894, Diesel tâtonne et il en fait part à sa femme, comme en témoigne cette lettre du 3 octobre 1894 : « *Au début de l'année, je me suis approché de mon but plus rapidement que prévu. Malheureusement, j'ai ensuite pris une autre direction dans l'espoir de meilleurs résultats. Aujourd'hui, je vois que le chemin initial était le bon et doit être suivi. Donc, je dois rétablir les résultats de février (tu étais présente à ce moment-là) et les compléter.* »

A la fin de l'année, la décision est prise de construire un deuxième prototype. En 1895, le kérosène est définitivement adopté comme combustible. Début 1896, le moteur tourne, mais il reste des difficultés techniques majeures : le compresseur d'air à un étage provoque des explosions inattendues, et fort dangereuses ; de plus, le pulvérisateur à tamis, composé de deux disques troués entre lesquels est enroulée une fine gaze métallique, s'encrasse et se bouche constamment.

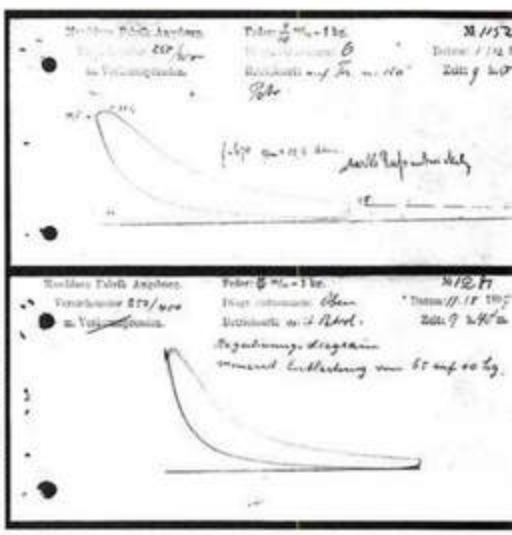
En 1897, le moteur est prêt à fonctionner. Son cylindre a 250 mm de diamètre et une course de piston de 200 mm. Pression et rendement thermique sont très éloignés des prétentions initiales (34 atmosphères, 31,9% contre 250 atm, et 73 %). Mais il constitue à l'époque un progrès sur les autres moteurs à combustion interne.

Il faudra plusieurs années pour résoudre ces deux problèmes.

Néanmoins, l'optimisme de l'inventeur est contagieux. Ainsi, le 23 janvier 1896, un rapport d'Augsburg estime que le processus arrive à son terme : « *Nous croyons que le temps est venu de commencer avec vigueur l'exploitation du moteur, maintenant qu'il a été confirmé qu'il est significativement supérieur à tout autre moteur à pétrole.* »

En mars 1896, les diverses parties décident de construire un troisième et dernier protoype, à moins qu'il ne soit considéré comme le premier élément d'une longue série... Ce moteur est construit avec un cylindre d'un diamètre de 250 mm et une course de 400 mm. La pression maximale dans le

Les mesures de pression et de volume effectuées sur le moteur donnent satisfaction à Diesel. Sur les diagrammes la surface entre les deux courbes s'est élargie.



DEUTSCHES MUSEUM MÜNCHEN

cylindre est de 34 atmosphères. Bien que Diesel ait abandonné l'idée de la combustion isotherme, son moteur conserve l'inflammation spontanée par compression et un rendement thermique élevé : 31,9 % (le rendement mécanique est de 75,9 %). Certes, ces chiffres sont loin de ceux avancés initialement par Diesel (rappelons-les : 250 atmosphères et 73 % de rendement thermique). Mais, comme l'affirme justement Augsburg, ils constituent un progrès significatif sur toutes les formes précédentes de moteurs à combustion interne. Par exemple, dans les années 1890, un moteur Otto avait une compression d'environ 4 atm et un rendement thermique de quelque 14 %.

Dans son ensemble, on peut considérer cette période de développement comme la dixième période cruciale, impliquant de nombreuses décisions successives, basées sur des facteurs internes. Diesel a certainement trouvé plusieurs idées en étudiant certains moteurs de l'époque. Peut-être a-t-il notamment puisé l'idée de l'injection de combustible sous pression dans l'examen du moteur de l'Américain George Brayton. Quoi qu'il en soit, à l'intérieur des limites fixées par Augsburg, Diesel est bien le seul responsable de la concrétisation de ses idées en un moteur réel.

HISTORISCHES ARCHIV M.A.N. AG AUGSBURG

Diesel, Buz et Schröter, à la sortie du congrès de Kassel en juin 1897. Dans son intervention, Schröter n'a pas hésité à présenter le moteur Diesel comme l'aboutissement de la théorie originale.

Début 1897, Diesel entrevoit la fin du tunnel : *« Je peux dire qu'à partir d'aujourd'hui les temps difficiles sont terminés et que le reste se développera automatiquement par ses propres mérites »*, écrit-il à sa femme. Ainsi débute la troisième période de la jeune histoire du moteur diesel. Celle de l'innovation, de la transformation du moteur en un produit commercialisable. Ici, interviennent des forces externes (procès intentés pour contester la validité des brevets, stratégies de vente) et des forces internes, telles que la poursuite des améliorations techniques du moteur. Pendant cette période, des erreurs critiques, commises par Diesel et la Compagnie Augsburg, hypothèquent gravement l'avenir du moteur.

Durant la seconde moitié de 1897, Diesel et la Compagnie prennent une onzième décision cruciale : commercialiser le moteur. Ils décident de le montrer à divers clients potentiels, puis de le présenter au grand public à travers une série de conférences. Point d'orgue de cette tournée, le congrès annuel de la Société des Ingénieurs allemands, en juin, à Kassel. Diesel et le professeur Moritz Schröter s'y expriment publiquement. Diesel fait l'impasse sur les différences sensibles qui séparent ce moteur réel de la théorie originale. Schröter, lui, affirme que le moteur symbolise le triomphe de la théorie et qu'il est prêt à être commercialisé. En fait, aucune des déclarations de Schröter n'est vraie.

Elles sont cependant très favorablement accueillies par de nombreux spécialistes, tel le professeur Alfred Musil,

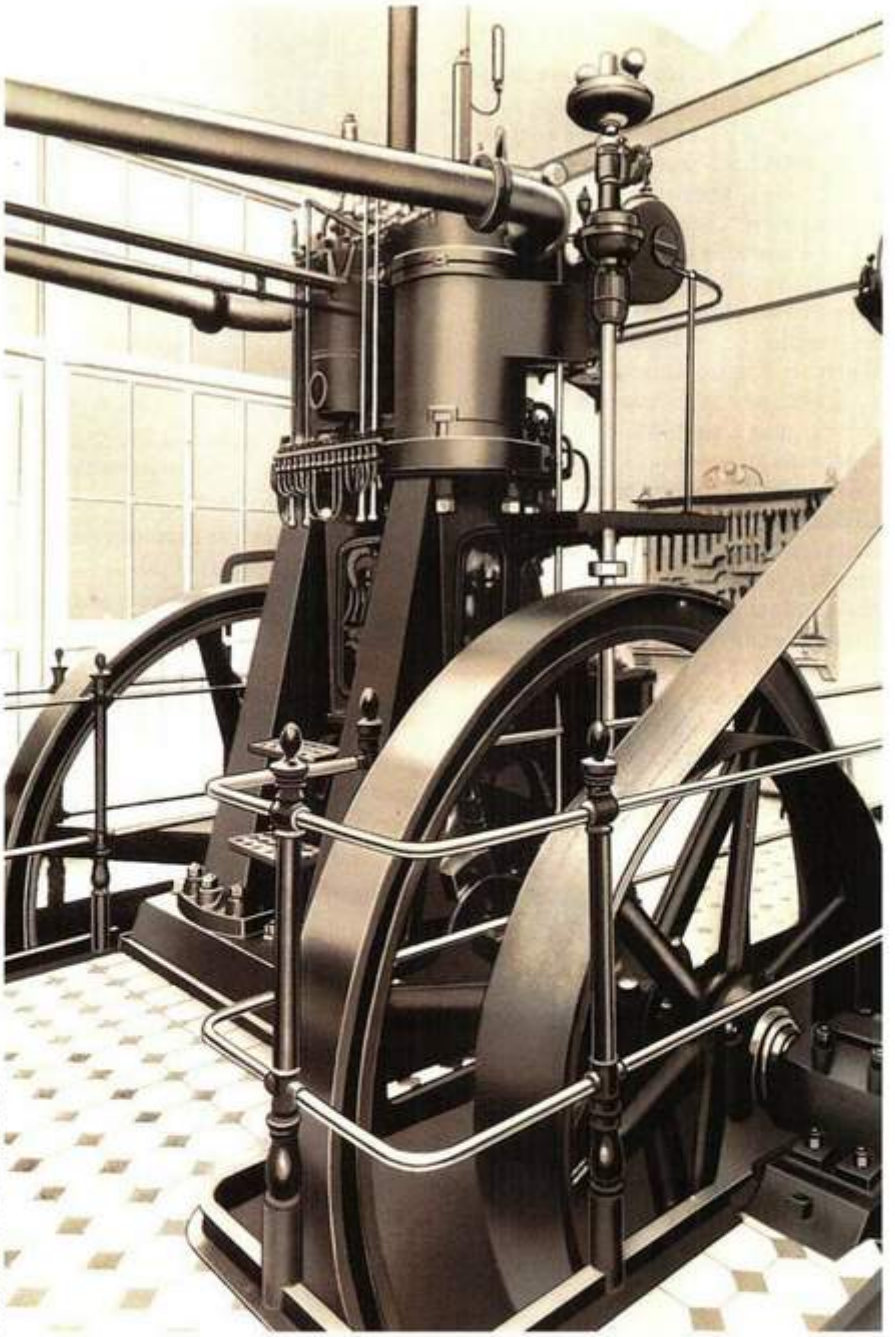
DEUTSCHES MUSEUM MÜNCHEN

En 1898, le moteur Diesel passe au stade de la commercialisation. Il est la vedette de plusieurs expositions. Ci-dessus, l'Exposition sur l'Energie à Munich.

de la Bremen Technische Hochschule, qui n'hésite pas à déclarer avec enthousiasme: « *Ces deux jours* [d'essais publics du moteur] *s'inscriront sans aucun doute en lettres rouges dans l'histoire de la construction de nos machines modernes, parce que le succès auquel Diesel est parvenu avec son moteur est déjà si brillant, la consommation de combustible durant le fonctionnement parfait de la machine est si petit en comparaison de tous les autres moteurs thermiques que, en dépit de toutes les prophéties antérieures, le moteur Diesel n'est pas seulement en droit d'avoir le nom de Moteur Thermique Rationnel, mais peut être appelé avec justice la source d'énergie du futur. L'inventeur est en droit de recevoir sans réserve la reconnaissance et la gratitude de ses contemporains.* »

Diesel et Augsburg sont convaincus que leur moteur a atteint le stade de la commercialisation. Entraînés par des facteurs externes, ils poussent à la signature de contrats de licence. N'est-il pas temps de tirer profit des investissements effectués pendant la période d'essais? Ils veulent aussi bénéficier le plus rapidement possible du monopole du brevet qu'ils détiennent. Car celui-ci doit expirer en 1908... Encore hésitant, Krupp recommande des essais supplémentaires. Mais Diesel et Augsburg parviennent à le convertir à l'idée d'une commercialisation immédiate.

Au cours des années 1897 et 1898, Krupp et Buz accordent des licences de construction des moteurs Diesel à un certain nombre de compagnies allemandes, comme *Deutz* ou la *Compagnie de construction de machines de Nuremberg*. (En 1898, les entreprises Augsburg et Nuremberg s'allieront pour former la *M.A.N.*, Compagnie de



M.A.N. WERK AUGSBURG WERKARCHIV

Le moteur est installé dans une fabrique d'allumettes à Kempten (en Bavière). Très vite ressurgissent les difficultés rencontrées au cours de son développement.

construction de Machines Augsburg-Nuremberg).

Diesel, lui, s'occupe des concessions étrangères. Pendant ces années, il met en place un réseau international de concessionnaires, des États-unis jusqu'à la Russie. Il devient vite richissime. Le 16 février 1698, par exemple, il écrit à sa femme : « *Note bien cette date. C'est la date de la signature de mon association avec le roi du pétrole Nobel et probablement le commencement d'événements qui bouleverseront le monde. Le Suédois au sang froid est maintenant, davantage que moi-même, tout feu tout flamme pour mon moteur.* »

En 1898, le moteur Diesel est la vedette de plusieurs expositions, entre autres, la seconde Exposition sur l'Énergie, à Munich, et l'Exposition électrique, organisée au Madison Square Garden de New York. En 1900, il recevra le Grand Prix de l'Exposition universelle parisienne.

Mais, dans les coulisses, l'agitation grandit. Divers procès sont intentés à Diesel, accusé d'avoir emprunté ses idées à d'autres auteurs. Bien que l'ingénieur soit capable de se défendre, ces accusations portent un coup fatal à sa santé. Maux de tête et insomnies accablent Diesel, déjà éprouvé par la longue période de développement du moteur et une tendance obsessionnelle au surmenage. La crise passée, il exprimera son ressentiment : « *J'ai été persécuté par de nombreux critiques qui m'ont poursuivi avec une haine proprement incroyable. L'écart par rapport à l'idéal théorique, qui était inévitable en pratique, a été dénoncé comme un crime vis-à-vis de la science, et le nouveau moteur a fait l'objet d'une opposition fondée sur l'indignation morale.* » A l'automne 1898, au bord de la dépression nerveuse, Diesel part passer quelques mois dans une maison de repos.

Après avoir recouvré la santé, il n'aura jamais plus ses capacités inventives d'antan. A la station d'essais d'Augsburg, il procède néanmoins à diverses expériences pour améliorer le moteur. Poursuivant ses idées initiales, il utilise de la poussière de charbon comme combustible, puis exploite un moteur à double détente. Mais toutes ces tentatives échouent. En raison de ces échecs, Buz prend une douzième décision cruciale : en 1899, il ferme la station d'essais. Le développement futur du moteur se poursuivra sans Diesel. « *La grande période héroïco-technique de Diesel est terminée* », écrira son fils et biographe Eugen.

Le premier moteur commercialisé comporte deux cylindres et affiche une puissance de 60 chevaux. Il est livré à une fabrique d'allumettes : située à Kempten en Bavière, elle est dirigée par le frère de Heinrich Buz. Mais apparaissent rapidement quatre problèmes majeurs, qui avaient été décelés au cours du développement sans être résolus : 1/les hautes pressions et les températures élevées causent la rupture des différentes pièces ; 2/le compresseur d'air à un étage provoque le

La société générale pour l'exploitation des moteurs Diesel

Septembre 1898. La signature et le suivi de contrats de licence de plus en plus nombreux s'avèrent une charge trop lourde pour un seul homme. Diesel souhaite « *rendre ses affaires indépendantes de sa personne.* » et fonde la Société pour l'exploitation des moteurs Diesel, l'*Allgemeine Gesellschaft für Dieselmotoren*. Située à Augsburg, son capital s'élève à 3 500 000 marks. Contre cette somme, Diesel cède à la société tous les brevets acquis sur son moteur ainsi que le droit de les exploiter. En fait, il achète des actions de la société à hauteur de 2,25 millions de marks. Parmi les autres actionnaires, figurent d'importantes sociétés industrielles allemandes : Krupp, M.A.N... D'autres sont des industriels, européens ou américains, ayant déjà, par le passé, signé des accords de licence d'exploitation avec Diesel. Ce sont par exemple E. Nobel, constructeur de machines à St-Petersburg ; A. Busch, de St- Lewis, États-unis ; les frères suisses Sulzer...

C'est le patron de la M.A.N., Heinrich von Buz, qui préside le conseil d'administration de la société. Diesel lui-même y siège jusqu'en 1906.

Au nombre des clauses du contrat passé entre Diesel et la société figure la capitale clause dite de *réciprocité* ou de *solidarité*. Elle implique que chaque entrepreneur détenteur d'un accord de licence passé avec la société, doive partager avec les autres concessionnaires toutes les améliorations relatives aux brevets sur le moteur. Diesel lui-même est dans ce cas. La société, chargée d'exploiter les brevets Diesel, n'est cependant pas directement impliquée dans la construction ou la vente du moteur. Elle dispose néanmoins, jusqu'en 1901, d'un bureau capable de proposer aux exploitants des améliorations d'ordre technique.

La Société générale d'exploitation des moteurs Diesel développe également une active politique de publicité en faveur de son moteur. Elle se charge en particulier de répondre aux diverses attaques dont il est la cible.

Les brevets acquis par Diesel tombent, en 1907, dans le domaine public. La société générale pour l'exploitation des moteurs diesel est, quant à elle, dissoute en 1911...

K. Chatzis

1 – Voir le numéro des *Cahiers de Science et Vie* sur Sadi Carnot, *L'insaisissable idéal de la machine*, p. 58.

bouchage ou même l'explosion de la pompe de compression ; 3/le pulvérisateur à tamis, qui s'encrasse et se bouche facilement, doit être continuellement nettoyé ; 4/enfin, les changements hasardeux et fréquents de combustible, auxquels le moteur est particulièrement sensible, entraînent d'importantes différences de rendement.

La Compagnie Augsburg est ainsi obligée d'envoyer deux mécaniciens puis, finalement, de faire appel à Imanuel Lauster lui-même pour surveiller le moteur jour et nuit. Il faudra un an d'attention de tous les instants, puis une complète reconstruction, pour que le moteur fonctionne enfin correctement.

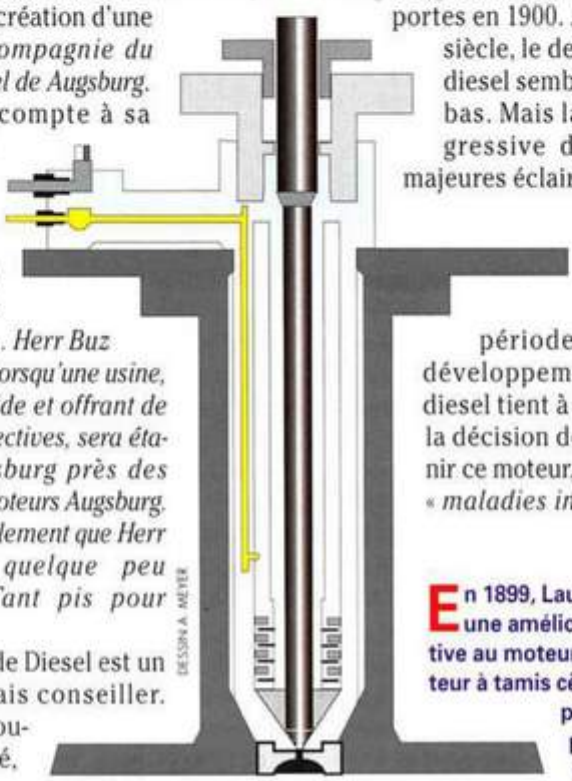
A cette époque, seule la M.A.N. possède l'expérience et le personnel nécessaires pour pallier à grands frais les défauts de jeunesse du moteur Diesel. Les autres licenciés n'ont pas cette chance. De fait, dès 1899, tous les concessionnaires allemands, ainsi que de nombreuses compagnies étrangères, auront abandonné la fabrication du moteur...

En 1897, Diesel s'est lui-même impliqué dans la création d'une usine, la *Compagnie du Moteur Diesel de Augsburg*. Il en rend compte à sa femme : « *La Compagnie des moteurs Diesel est née avec grand style... Herr Buz sera surpris lorsqu'une usine, à la fois solide et offrant de belles perspectives, sera établie à Augsburg près des usines des Moteurs Augsburg. Je crains seulement que Herr Buz soit quelque peu envieux. Tant pis pour lui...* »

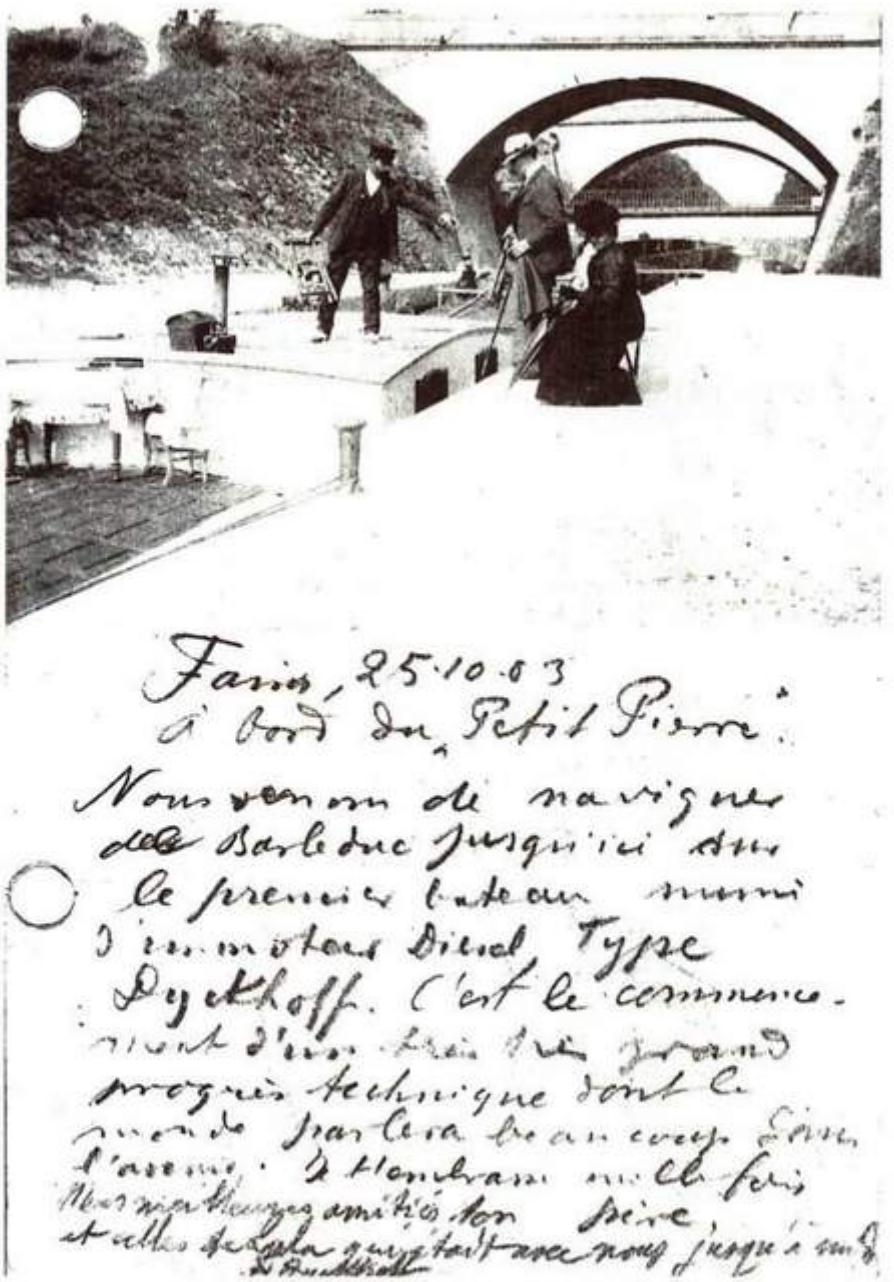
L'orgueil de Diesel est un bien mauvais conseiller. Car cette nouvelle société, bien qu'elle soit sous licence d'Augsburg, ne bénéficie pas d'un personnel compétent. Elle ne réussira jamais à fabriquer un moteur fonctionnant correctement. L'un de ses employés s'en souviendra, bien des années plus tard : « *Le drame a commencé immédiatement avec ce que je crois être le premier moteur Diesel, produit pour Perm en Oural. Il est sorti de l'usine sur un wagon couvert de lauriers et, quelques mois plus tard, est repassé par les mêmes portes sans une chanson ou une danse.* »

Buz, loin d'être envieux, est furieux. Il écrit à Diesel pour lui dire tout le mal qu'il pense des moteurs fabriqués dans l'usine fondée par l'inventeur : « *Tant que ces moteurs si misérablement construits, tels que ceux de Breslau, Pensa et Arad, etc., etc., ne seront pas éliminés de la face de ce monde, ils continueront à être un poids pour la cause du Diesel, et je déplore le fait que nos compétiteurs aient ainsi été dotés de munitions pour nous attaquer avec succès.* »

La *Compagnie du Moteur Diesel d'Augsburg* est obligée de fermer ses portes en 1900. Au tournant du siècle, le destin du moteur diesel semble ainsi au plus bas. Mais la maîtrise progressive des difficultés majeures éclaircit petit à petit l'avenir du moteur. La treizième et dernière période cruciale du développement du moteur diesel tient à deux facteurs : la décision de Buz de soutenir ce moteur, en dépit de ses « *maladies infantiles* », et le



En 1899, Lauster apporte une amélioration significative au moteur : le pulvérisateur à tamis cède la place au pulvérisateur à plaque métallique.



M.A.N. WERKARCHIV AUGSBURG

Le 25 octobre 1903, Diesel relate sa promenade à bord du *Petit Pierre* : la première péniche à propulsion diesel.

travail des ingénieurs d'Augsburg. A l'automne 1899, après plusieurs expériences avec différents types de pulvérisateurs, Lauster et ses collègues remplacent le pulvérisateur à tamis par un pulvérisateur à plaque métallique. Pour réaliser la pulvérisation, l'air comprimé pousse le combustible à travers une série de quatre disques, perforés en chicane. Le système n'est pas exempt de défauts, mais ce pulvérisateur à plaque métallique contribuera fortement à rendre le moteur Diesel commercialisable.

Dans les années 1899-1900, la deuxième amélioration est l'œuvre des compagnies *L.A. Riedinger*, à Augsburg, et *M.A.N.* Elle concerne un compresseur d'air perfectionné qui comprime, sur deux étages, l'air nécessaire à l'injection du combustible dans le cylindre. Cela supprime les dangers d'explosion de l'huile lubrifiante. Ce compresseur d'air à deux étages sera l'une des caractéristiques des moteurs Diesel jusqu'à ce qu'il soit remplacé, dans les années 1920, par l'injection mécanique directe de combustible.

D'autres expérimentations sont continuellement menées pour trouver de nouveaux métaux susceptibles de supporter les hautes pressions et les températures élevées du moteur. Par ailleurs, les essais amènent peu à peu à choisir des combustibles plus fiables et moins chers comme, par exemple, divers types d'huile de goudron.

Dès 1901, *M.A.N.* entame la production de la série DM, caractérisée par des moteurs relativement légers. On y a remplacé le piston à tête de crosse par un piston à fourreau déjà utilisé dans les moteurs à essence. Cette série est très bien accueillie. Jusqu'en 1912, elle demeure le modèle de base pour les moteurs stationnaires.

Tout au long de la première décennie du XXe siècle, le moteur diesel est en effet principalement utilisé comme générateur fixe de force motrice. Cependant, en 1903, il commence à être appliqué à la propulsion des bateaux. La première péniche diesel, le *Petit Pierre*, est construite en France et circule sur le canal Rhin-Marne. Dès la Première Guerre mondiale, le diesel est adapté sur des navires et des sous-marins. Juste avant la guerre, *Krupp* et *M.A.N.* mettent au point un moteur Diesel à deux temps. Après la Première Guerre mondiale, l'injection directe, les pompes d'injection de combustible standardisées et la suralimentation ouvrent la voie à l'adaptation du diesel aux locomotives, aux camions et aux automobiles.

Mais l'inventeur ne verra pas la généralisation de son invention. Sa disparition en 1913 l'en aura empêché. A vrai dire, elle lui avait échappé depuis fort longtemps... ■

REVUE DE PRESSE

1897/1898. Doute, enthousiasme, critique – parfois féroce… Toute la presse ne réagit pas également à l'annonce de l'invention de Diesel. Entre théorie et pratique, on discute ferme. En 1912, outre-Atlantique, Diesel lui-même prend la plume, dans les colonnes du *Scientific American*.

PAR VANINA PIALOT

Le plus économique des moteurs à pétrole

Juin 1897 : Diesel présente son moteur à la rencontre de Kassel. La nouvelle *fait grand bruit dans le monde savant et industriel*. Les revues scientifiques et techniques s'en emparent. En France, elles sont légion : *La revue industrielle, La nature, La locomotion automobile, L'industrie électrique, La revue générale des sciences, Cosmos*… Enfin, « *on peut dire que* (la machine de Diesel) *a eu bonne presse, car on a été à peu près unanime dans l'éloge.* » (*La revue générale des sciences*, 15 juin 1898).

Pourtant, au départ, il semblerait tout de même que l'on se méfie un peu de l'invention de l'*ingénieur de Munich, M. Rudolph Diesel*…

Ainsi, dans *La Nature*, le 21 août 97, deux mois à peine après Kassel : « *Empressons-nous de signaler cette invention pendant que les périodiques d'Outre-Rhin la placent au Capitole. Quelques semaines de retard nous exposeraient peut-être à la trouver au bas de la Roche Tarpéienne !* » Prudence et circonspection… « *(…) M. Diesel s'occupe actuellement d'essayer à Augsbourg une machine de 150 chevaux dont les qualités seraient encore plus merveilleuses. Attendons pour y revenir d'avoir des renseignements plus complets car, tout en souhaitant la confirmation d'une telle découverte, il est prudent de rappeler l'hémistiche du poète : Timeo Danaos et dona ferentes…* »

En janvier 1898, on se rend toutefois à ce qui paraît être une évidence : « *la nouvelle de ses extraordinaires résultats, d'abord accueillie avec une certaine réserve, se confirme et il semble impossible de ne pas y croire, après les essais auxquels a été soumis le nouveau moteur.* » (*La revue industrielle*)

Il faut reconnaître que le moteur « tient la route », en particulier sur la question du rendement. « *L'élévation de ce rendement montre la supériorité du système sur ceux qui l'ont précédé.* » (La revue industrielle, janvier 1898). Pour *La Revue générale des Sciences*, en juin 1898, « *le bénéfice est indiscutable. (…) L'arbre se reconnaît à ses fruits. (…) Le moteur Diesel est donc, sans contredit, le plus économique des moteurs à pétrole construits à ce jour*[1]. »

La pratique est donc concluante. Mais elle ne colle pas à la théorie… « *Le cycle théorique a dû être écourté* (…)», et si l'on regarde « *le diagramme relevé sur la machine du dernier modèle* (…) *les déformations* (par rapport au cycle théorique) *sont évidentes, et le rendement, basé sur l'existence d'isothermiques et d'adiabatiques (que l'on ne réalise pas), se trouve nécessairement réduit.* » (*La Revue générale des sciences*, juin 1898).

Mais, Diesel soutenant à l'époque que tout fonctionne comme il l'avait prévu, on peut y croire : « *Dans son brevet, il définissait ainsi la nature de son moteur* (…). *En partant de ce principe, M. Diesel est arrivé à construire un moteur* (…)» (*La Nature*, novembre 1897). De même, dans *La locomotion automobile* de décembre 1897 : « *les conditions générales énumérées* (…) *dans l'exposé du principe sont réalisées dans le moteur* ». En particulier, « *la détente* (est) *sensiblement isothermique* », proposition que Diesel avait abandonnée (sans toutefois l'ébruiter) dès 1893.

D'autres passent outre : les écarts par rapport à la théorie ? Qu'importe ! « *Nous n'avons pas besoin de dire qu'en pratique la compression ne se fera pas rigoureusement sous une adiabatique, et encore moins la détente suivant une isotherme, mais cela n'altère pas l'essence même du procédé.* » (*La Revue industrielle*, janvier 98). Et cela n'empêche pas que « *ces résultats vraiment nouveaux supposent la mise en œuvre de principes inédits* ».

Des principes inédits ? Pour certains, cela tient de l'imposture. Tout d'abord, le principe d'introduction graduelle du combustible « *n'est pas nouveau* », et, ajoute Aimé Witz, dans *La revue générale des sciences* (juin 98), « *je suis forcé de dire* (…) *que le fait ne l'est pas davantage* ». Quant à atteindre la température de combustion avant cette dernière, « *rien de bien nouveau non plus dans* (cette) *formule* ». Il n'y a que le fait que le combustible soit introduit à la fin de la compression adiabatique qui « *constitue*, (pour Aimé Witz), *la plus grande originalité de l'invention de M. Diesel* ».

C'est qu'il s'agit de rétablir les priorités… « (…) *je demande à l'Académie la permission de rappeler la formule de rendement que j'ai établie, dès 1883,* (…) *parce qu'elle permettait de prévoir les résultats de M. Diesel.* » (Aimé Witz, *La revue industrielle*, 23 avril 98). Ou bien encore, « *M. Witz constate que sa théorie* (…) *reçoit dans cette circonstance une confirmation nouvelle* ». (Cosmos, 9 avril 1898).

Ainsi donc, toute cette publicité autour d'une nouvelle théorie était-elle bien nécessaire ? Car enfin, « *le perfectionnement est d'ordre pratique ; cela n'en diminue pas la grande valeur que je désire voir proclamer hautement ; mais il m'a paru utile de démontrer que le cycle des anciens moteurs à combustion n'avait pas besoin d'être modifié pour donner ces rendements théoriques considérables qui ont provoqué tant d'espérances et suscité tant d'efforts.* » (*La revue industrielle*, A. Witz)

Ou bien le même, plus clair encore, dans *La revue générale des sciences*, le 15 juin 1898 : « *En un mot, le cycle Diesel n'a aucune prééminence théorique sur le cycle des moteurs à combustion.* »

Avis partagé par un auteur anonyme de *La revue industrielle*. « *La réalisation de cette dernière machine peut d'ailleurs se concevoir sans avoir recours aux théories mises en avant par l'inventeur.* »

Et de toute façon, « (…) *M. Letombe a démontré à la Société industrielle du Nord de la France que* (les) *principes* (de Diesel) *n'ont qu'un rapport éloigné avec la thermodynamique et que bien des assertions de l'inventeur sont sujettes à discussions*[2]. »

Au final, Aimé Witz invite les inventeurs à suivre l'exemple pratique, et non théorique, de Diesel, et à se tourner à nouveau vers les moteurs à combustion… Et de conclure : « *Il y a longtemps qu'on le leur avait dit.* »

La théorie de Diesel se retrouve donc sous les feux croisés de certains auteurs. Cependant, per-

1. Cet article expose une communication faite à l'Académie des sciences par son auteur, Aimé Witz. Cette dernière sert également de base à l'article de *La revue industrielle* du 23 avril 98, ainsi qu'à celui de *Cosmos* du 9 avril.

sonne ne doute que le moteur ait un avenir. D'abord, il semble tout désigné pour l'automobilisme. *La Nature*, dès le 21 août 97, souligne que « *la mise en marche se produirait facilement par l'ouverture d'un simple robinet (...). C'est un avantage qu'on appréciera pour les tramways et les automobiles.* » *La locomotion automobile* lui emboîte le pas, en décembre 97 : « *l'absence de tout allumage, électrique, à flamme ou à tube incandescent, l'absence de lampes, d'appareils vaporisateurs, pulvérisateurs et carburateurs constitue aussi une simplification que les automobilistes apprécieront tout particulièrement.* »

Quant à l'avenir de l'invention dans ce domaine, laissons la parole à *La Locomotion automobile* : « *Peut-être le moteur Diesel est-il déjà mûr pour revendiquer sa place dans les futures épreuves réservées aux Poids Lourds par l'Automobile-Club de France. L'avenir nous apprendra si ces prévisions sont trop optimistes.* »

De plus, voilà un moteur d'un confort extraordinaire : inodore et non polluant ! Ainsi, nous dit *La Locomotion automobile*, « *l'odeur des gaz d'échappement est très faible et ces gaz sont invisibles* ». Pour *La Nature*, « *d'après le professeur Schröter, la combustion s'effectuerait parfaitement, les gaz dégagés ne sentiraient « presque » rien (...)* ». La *Revue industrielle* insiste, en janvier et avril 98 : « *M. Diesel mentionne comme autre avantage de son moteur* » qu'il ne rejette « *dans l'atmosphère que des gaz presque invisibles et inodores.* », puis, en août : « *(...) il donne une combustion parfaite, sans odeur, ni résidus* ».

Faut-il voir l'origine d'une si belle harmonie dans le fait que « *le rapport de M. Schröter a servi de base à toutes ces études* » (*La Revue générale des sciences*) ?

Après le pétrole, l'huile d'arachide...

On lui trouve également des avantages pour le domaine de l'industrie. « *On peut, en s'en allant, abandonner l'usine à elle-même, sans avoir à se préoccuper de l'entretien de la chaudière pour le lendemain, et sans crainte d'incendie, car le moteur à combustion intérieure n'est jamais en feu que pendant la marche et s'éteint automatiquement à l'arrêt.* » Une merveille, car ainsi « *les compagnies d'assurance seront (...) peu exigeantes au point de vue des dangers d'incendie.* » (*L'industrie électrique*, 25 décembre 97)

Mais quel combustible utiliser avec ce nouveau moteur ? Pour les automobiles, les combustibles liquides conviennent parfaitement, mais pour l'industrie... « *En dernière analyse, après le moteur rationnel à pétrole, aujourd'hui un fait accompli, il reste à créer un moteur à farine de charbon, ou à farine de coke qui transformera certainement l'industrie de la force motrice au siècle prochain.* » (*L'industrie électrique*, décembre 97).

C'est qu'à la fin du XIXe siècle, la houille est encore le seul combustible à être utilisé industriellement. « *Le moteur Diesel peut être dès à présent considéré comme réalisé en tant que moteur à pétrole. (...) mais, il ne donnera sa pleine mesure que quand il marchera avec de la houille.* » (*La Revue industrielle*, janvier 1898).

Et pourtant, dès 1898, toutes sortes d'expériences sont menées sur des combustibles divers : huiles végétales, minérales, animales... Et l'imagination va bon train. « *A l'exposition universelle de Paris en 1900, la compagnie Otto montrait un petit moteur Diesel, qui, à la demande du gouvernement français fonctionnait avec de l'huile d'arachide. (...) Le gouvernement français pensait à cette époque à tester les possibilités d'application de l'énergie disponible de l'arachide, qui pousse en quantités considérables dans ses colonies africaines, et qui peut aisément y être cultivée ; car, de cette façon, les colonies pourraient subvenir à leurs besoins en travail et en industrie, avec leurs propres ressources, sans être obligées d'acheter et d'importer du charbon ou du pétrole* », écrit Rudolph Diesel dans le Scientific American du 20 avril 1912.

Et il spécule : « *On ne peut actuellement prédire quel rôle ces huiles vont, à l'avenir, jouer dans les colonies. En tout cas, une chose est sûre : la force motrice peut être produite grâce à la chaleur du soleil. Celle-ci pourra toujours être utilisée à des fins agricoles, même quand toutes nos réserves naturelles de combustibles liquides et solides seront totalement épuisées.* » Prémonitoire ? Peut-être... ■

L. DE SEVA - TAPABOR

Le Scientific American, revue hebdomadaire, publie en 1912 un article signé R. Diesel.

2. Le même Letombe, en décembre 1913, fait, dans la toute jeune revue *La Science et la Vie* – elle paraît depuis avril –, un exposé élogieux du moteur Diesel. Par exemple, « *partout où un encombrement réduit et une mise en marche instantanée sont nécessaires, le moteur Diesel, au point de vue tant du fonctionnement que du prix de revient peu élevé de la force motrice, apparaît comme le moteur idéal. La suprématie de la houille n'existe plus grâce au moteur Diesel.* »

DECOUVREZ LE PANORAMA DE LA PRESSE SCIENTIFIQUE...

SCIENCE & VIE

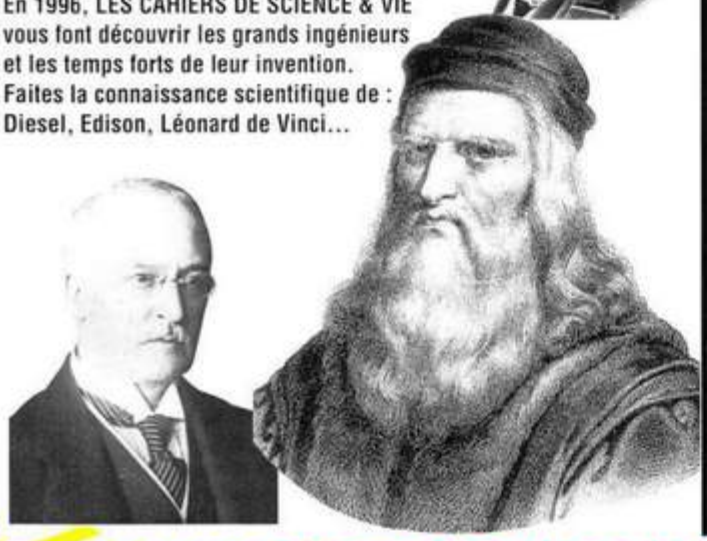
Tous les mois,
SCIENCE & VIE vous informe parfaitement sur les derniers développements de la recherche, dans tous les domaines scientifiques et techniques.
SCIENCE & VIE, le magazine d'information scientifique de référence.

SCIENCE & VIE HORS SERIE

Tous les trois mois,
LES HORS SERIE de SCIENCE & VIE traitent de façon exhaustive un grand sujet de notre temps. Chaque HORS SERIE fait le tour complet d'une question d'actualité scientifique.

LES CAHIERS DE SCIENCE & VIE

Tous les deux mois,
LES CAHIERS DE SCIENCE & VIE vous font vivre l'histoire des sciences comme on ne vous l'a jamais racontée.
En 1996, LES CAHIERS DE SCIENCE & VIE vous font découvrir les grands ingénieurs et les temps forts de leur invention.
Faites la connaissance scientifique de :
Diesel, Edison, Léonard de Vinci...



ET ABONNEZ-VOUS DES AUJOURD'HUI A L'UNE DE CES DEUX FORMULES :

FORMULE N° 1

ABONNEMENT D' 1 AN AU PANORAMA DE LA SCIENCE

12 Nos de SCIENCE & VIE
6 Nos des CAHIERS DE SCIENCE & VIE

349 F
seulement au lieu de 468 F *

FORMULE N° 2

ABONNEMENT D' 1 AN AU MAXI PANORAMA DE LA SCIENCE

12 Nos de SCIENCE & VIE
6 Nos des CAHIERS DE SCIENCE & VIE
4 Nos HORS SERIE DE SCIENCE & VIE

405 F
seulement au lieu de 568 F *

DROITS RESERVES

BULLETIN D'ABONNEMENT A TARIF PRIVILÉGIÉ

à compléter et à retourner avec votre règlement à l'ordre de SCIENCE & VIE sous enveloppe affranchie à :
SCIENCE & VIE - Service Abonnements - 1, rue du Colonel Pierre Avia 75503 Paris cedex 15.

OUI je m'abonne pour un an et à tarif privilégié à la formule suivante que je coche ci-dessous :

☐ C43A **FORMULE N°1 : PANORAMA DE LA SCIENCE** (18 Nos)
349 F seulement au lieu de 468 F * / **119 F** d'économie

☐ C43Z **FORMULE N°2 : MAXI PANORAMA DE LA SCIENCE** (22 Nos)
405 F seulement au lieu de 568 F * / **163 F** d'économie

Nom
Prénom
Adresse
Code postal Ville

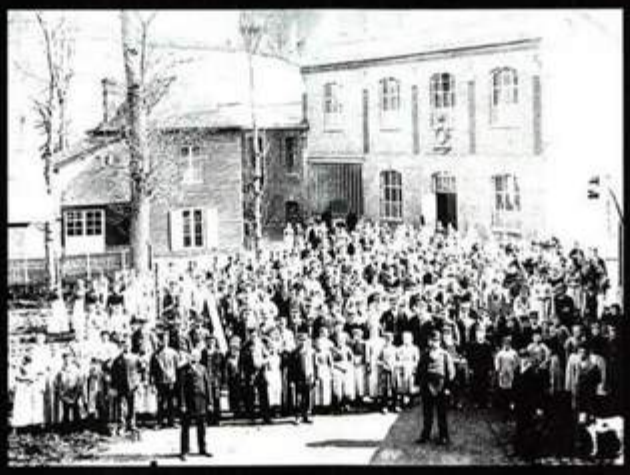
Conformément à la loi Informatique et Liberté du 06/01/1978, vous disposez d'un droit d'accès aux données personnelles vous concernant. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'autres sociétés ou associations. Si vous ne le souhaitez pas, il vous suffit de nous écrire en nous indiquant vos nom, prénom, adresse et, si possible, votre référence client.

OFFRES VALABLES JUSQU'A FIN 1996 ET RESERVEES A LA FRANCE METROPOLITAINE.ETRANGER: NOUS CONSULTER Tel (33-1) 46 48 47 08
Vous pouvez aussi vous abonner par Minitel en tapant 3615 ABON

(*) Prix de vente normal chez votre marchand de journaux

RC PARIS B 572 134 773

VISION D'INGÉNIEUR



Au XIXe siècle, les inventeurs ingénieurs sont souvent visionnaires. D'abord parce qu'ils s'identifient volontiers à l'humanité dont ils veulent faire le bonheur. Ensuite, parce qu'ayant appliqué leur raison à concevoir un assemblage inédit d'éléments destinés à fonctionner de façon ordonnée et harmonieuse, ils pensent que cette démarche, appliquée aux questions sociales, produira les plans d'une société rationnelle et pacifiée. La machine sociale de Diesel, c'est la société des abeilles.

J.L. CHARMET

RUDOLF DIESEL, UTOPISTE SOCIAL

Dans l'Europe de la fin du XIXe siècle, le réformisme social est à la mode. Le rationalisme triomphant des ingénieurs saura-t-il résoudre la question sociale ? Rudolf Diesel en est persuadé. S'inspirant du modèle de la ruche, il dessine les plans de la cité idéale du travail, fondée sur la solidarité de ses « abeilles ».

PAR GEORGES RIBEILL ET MONA DE PRACONTAL

Nous sommes dans le dernier quart du dix-neuvième siècle. La première *Révolution industrielle*, celle de la machine à vapeur triomphante, lègue de nombreux problèmes : concentration urbaine des usines, « lutte des classes »,... La *Seconde Révolution industrielle* est en marche, avec son cortège d'inventions : électricité, moteurs à explosion ou à combustion interne,... Celle-ci peut-elle prétendre apporter des réponses à la *question sociale* héritée de celle-là ? Le jeune ingénieur Rudolf Diesel en est persuadé.

Dans ce contexte de fin de siècle, la scène de l'idéologie sociale est déjà fort peuplée. Le *réformisme social* est à la mode. La démarche de Diesel est alors tout à fait typique de celle de nombre d'ingénieurs [1]. Leur foi en la science conquérante de la nature, en une rationalité intelligible et maîtrisée des phénomènes physiques, leur apparaît démontrée par les succès des nouvelles technologies. Elle déborde vite en une représentation des faits sociaux susceptible d'une même rationalisation. Celle-ci est mise au service de la résolution pratique des pathologies du corps social soumis au régime sévère de la grande industrie.

A la base de ce *positivisme*, qui assimile le social au physique et voudrait fonder l'art de gouverner sur une nouvelle *mécanique sociale*, l'ingénieur-technologue est confronté à la promotion de ses innovations dans le corps social. Il est tenté de s'ériger en *ingénieur social*, en thérapeute outillé par les certitudes de sa rationalité. Qui d'autre que l'ingénieur, pris en étau entre le patron et les ouvriers, est mieux placé pour ressentir quotidiennement les effets de cet antagonisme de classes, que le capitalisme industriel a institué et concentré entre les murs de ses nouvelles manufactures et usines ?

On sait qu'à l'issue de ses années d'apprentissage, passées en 1879-1880 dans les établissements Sulzer en Suisse, Rudolf Dielsel a été embauché à Paris comme ingénieur frigoriste chez son compatriote Karl Linde. Durant son séjour d'une dizaine d'années en France, il connaît la difficile et délicate condition du technicien salarié. Avec un modeste salaire de 100 francs par mois, qu'entament très largement 30 francs de loyer et 2 francs de nourriture par jour, le jeune ingénieur s'interroge sur sa condition sociale, comme celle des plus modestes travailleurs. Cette question s'installe au centre de ses préoccupations. Dans une lettre du 22 juin 1880, Diesel écrit à ses parents

Par les multiples bouleversements qu'elle entraîne, l'ère industrielle est féconde en théories de la solidarité sociale. Toutes s'intéressent à la façon d'organiser la société de manière rationnelle.

1 – Cf. l'une des sources du présent article : le chapitre 2 de l'ouvrage de Donald E. Thomas, Jr, Diesel, *Technology and Society in Industrial Germany*, The University of Alabama Press, 1987.

BE UNITED AND INDUSTRIOUS
AMALGAMATED SOCIETY OF ENGINEERS, MACHINISTS, MILLWRIGHTS, SMITHS, AND PATTERN MAKERS.
This is to Certify that
BRIDGEMAN - GIRAUDON

J.L. CHARMET - BN

En France, les utopies socialistes sont légion. La première est celle conçue par Saint-Simon au début du siècle, et qui fera de nombreux émules parmi les ingénieurs.

et se lamente : « *Je n'ai aucun droit envers l'Etat, je ne peux voter ni prendre part à la vie publique, ce qui est un des buts de ma vie depuis que la question sociale est chère à mon cœur.* » Il lit Zola et, sans doute, connaît-il les écrits des socialistes utopistes français, Louis Blanc, Fourier, Proudhon, tous pourfendeurs des nouvelles « *féodalités industrielles* ».

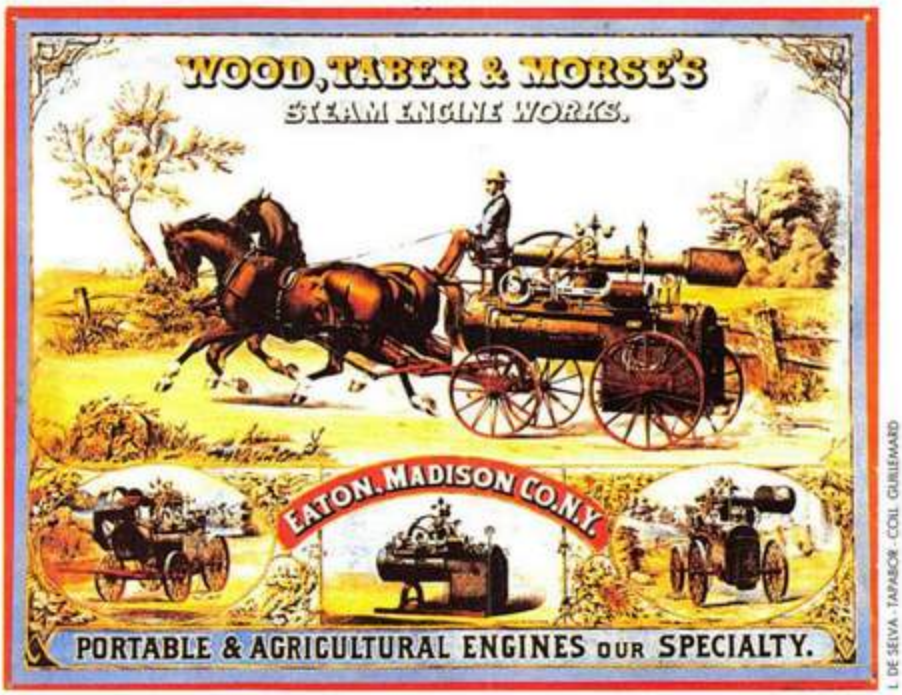
En 1887, il expérimente chez Linde un nouveau moteur à ammoniac. Sa motivation, affirme-t-il, n'est pas uniquement de nature technique. Certes, il serait fier de détrôner la machine à vapeur et de la remplacer par un moteur plus performant du point de vue thermodynamique. Mais il vise aussi à concevoir un moteur qui permette à l'artisanat et aux petites industries de maintenir leur compétitivité face à la grande industrie conquérante. Pour servir la promotion de son petit moteur, Diesel brouillonne ainsi une liste de quatre pages d'applications potentielles : dentisterie, bijouterie, tissage, menuiserie, imprimerie, mais encore appareils ménagers, restaurants, petits bateaux, pompes à eau, hôpitaux, etc. Toutes ces activités devraient trouver dans son moteur de très grandes facilités d'usage...

Lorsqu'il se consacre, quelques années plus tard, au moteur à combustion, il enrobe sa nouvelle invention des mêmes attributs sociaux potentiels. La lecture du brouillon de son premier brevet d'invention, daté du 26

Pour certains, la machine à vapeur favorise la concentration industrielle, entraînant de ce fait la prolétarisation des populations urbaines. (Sortie des ateliers Whitworth à Coventry)

J.L. CHARMET

La machine à vapeur est loin de se confiner à l'usine. Les fabricants en proposent de petits modèles qui s'adaptent à toutes sortes d'utilisations.



L. DE SELVA - TAPABOR - COLL. GUILLEMARD

février 1892, témoigne de cette obstination. L'accent y est mis sur la petite taille de son moteur et son indépendance énergétique par rapport aux ressources en charbon, en gaz, en électricité ou en eau : « *Toutes ces caractéristiques en font un moteur spécialement bien approprié en tant que petite machine. De cette manière, une décentralisation de la petite industrie est possible, au lieu de sa concentration dans les grandes villes. Si bien qu'un tel procédé impliquerait des avantages politiques, économiques et hygiéniques.* »

Cette même argumentation est reprise encore dans son premier livre, *Théorie et construction rationnelles des moteurs à chaleur*, publié en 1893. Dans sa conclusion consacrée aux applications de son moteur, Diesel souligne comment celui-ci, à la fois petit, bon marché et léger, comparable à une machine à coudre, devrait être capable d'entrer en compétition avec les forces motrices centralisées usuelles : « *Il est sans doute préférable de décentraliser la petite industrie autant que possible et de tenter de la fixer au voisinage de la ville, ou même à la campagne, plutôt que de la concentrer dans les grandes villes où elle est déjà à l'étroit, sans air, lumière ou espace. Cet objectif peut être atteint seulement avec une machine autonome, celle-là même proposée ici, et qui est d'un usage facile. Sans doute, le nouveau moteur peut-il mieux contribuer au développement de la petite industrie que les tendances récentes, vicieuses du point de vue économique, politique, humanitaire et hygiénique* ». Et de ne pas oublier de prévoir que son application aux locomotives, voitures de ville et autres, faciliterait la décentralisation même des transports.

Là encore, à cette époque, Diesel n'est pas le seul inventeur de moteurs nouveaux dont la petite taille – et donc l'accès à tous –, conjuguée à l'usage d'une énergie abondante et omniprésente, fonde des projets similaires d'émancipation économique ou sociale.

Evoquons en France L.D. Girard, inventeur de moteurs hydrauliques sur coussins d'eau ou d'air : en 1868, l'une de ses brochures, *Distribution de force à domicile-Emancipation du travail industriel*, en résumait déjà l'immense portée sociale potentielle... En 1879, grâce à sa machine hydrodynamique, à son moteur rotatif avec fluide recyclable, Testud de Beauregard annonce une *Révolution industrielle* dont les bienfaits se feront sentir non seulement dans les moyens de transports maritimes et ferroviaires, mais « *jusque chez le petit industriel, qui pourrait facilement se procurer une machine motrice d'un prix peu élevé, d'un poids insignifiant et consommant très peu de combustible* ». En 1882, promoteur des moteurs solaires de Mouchot et Piffre, Louis de Royaumont esquisse à son tour les bienfaits industriels de la nouvelle *Héliodynamique* à venir.

Bon nombre des pionniers des moteurs à gaz, à air comprimé, ou comme Diesel, à ammoniac, n'hésiteront pas à redessiner la civilisation bouleversée par leurs inventions. Tel Charles Tellier, frigoriste réputé, bâtisseur d'une nouvelle civilisation fondée sur l'ammoniac, généreuse mais quelque peu utopique... Ou encore Henri Bresson : plutôt que la *houille blanche* (soit l'exploitation hydroélectrique des torrents de montagne) impliquant de lourds et coûteux équipements, la *houille verte* (combinant roues hydrauliques ou turbines et dynamos installés sur les petits ruisseaux de plaine) inspire à son promoteur quelques « *visions électriques* » bucoliques, telle la régénération des petites industries traditionnelles du Perche, de ses fabriques d'aiguilles et épingles.

Les technologues allemands ne sont pas en retrait dans ce mouvement d'idées. Donald E. Thomas rappelle que Siemens, Lilienthal, Otto et Langen, étaient également convaincus que chacun de leurs moteurs ou procédés assurerait le salut du petit artisan. Karl Linde, quant à lui, avait eu comme pro-

J.L. CHARMET - MUSÉE CARNAVALET

A l'heure où le syndicalisme s'affirme, certains voient dans le regroupement des usines un terrain propice à la contestation ouvrière. (Fondeurs en grève devant l'usine de MM. Cail et Cie)

fesseur le grand mécanicien Franz Reuleaux : dans son *Lehrbuch der Kinematik* paru en 1875, celui-ci rappelait que les petits moteurs récemment apparus constituaient bien « *les véritables moteurs du peuple* » et que « *la science des machines avait son mot à dire dans la question sociale* ».

ECHO FAVORABLE CHEZ LES CONSERVATEURS SOCIAUX

Ces idéologies technicistes trouvent un large écho auprès des libéraux conservateurs, inquiets de voir les petites et sages industries artisanales ou familiales déstabilisées par la grande entreprise capitaliste. Le petit moteur, c'est la force motrice autonome et bon marché, capable de revitaliser le petit atelier artisanal ou familial. Le moteur domestique en particulier, en permettant le *travail à domicile*, est l'instrument bienvenu de la restauration de la famille ouvrière, stable et unie, qu'a détruite ou dispersée le travail dans les grandes usines.

Les réformistes de l'Ecole de Le Play, regroupés depuis 1856 dans la *Société d'économie sociale*, sont parmi les premiers à épouser un tel mouvement d'idées. Après avoir dénoncé la centralisation funeste de la production industrielle résultant de l'emploi de la machine à vapeur, Denayrouse peut clamer en 1883 que « *le jour où la force pourra être produite ou distribuée économiquement à domicile, le jour où ce grand desideratum de l'industrie moderne qu'on a appelé le* Moteur domestique *permettra à l'ouvrier d'actionner chez lui ses instruments, ce jour-là sera un de ceux que la démocratie pourra marquer d'une pierre blanche* »!

Le moteur électrique inspire de nombreux projets réformateurs. En 1906, Pierre Leroy-Beaulieu écrira que cet « *agent de décentralisation* » doit assurer la « *reconstitution de l'atelier de famille* », selon des modalités que précise Georges Picot : « *Autour du moteur électrique, se reconstitue la famille ! La femme demeure à son foyer, alternant les soins du ménage avec ceux de l'industrie ; sa fille l'aide, les fils sont apprentis (...). Tout rentre ainsi à sa place ; tout est dans l'ordre. Il y a peu de problèmes dont l'étude soit plus attachante. Le sort de l'industrie et la moralité de la famille ouvrière en dépendent* ». Quelques arrière-pensées ne sont pas absentes chez Charles Benoist, à l'heure où s'affirme le syndicalisme ouvrier, reconnu par la loi depuis 1884 : « *Le mouvement à domicile, ce serait la fin de l'usine, et la fin de l'usine, ce serait la dispersion des ouvriers que la vapeur avait rassemblés autour de l'usine. Moins étroitement groupés par le fait, les ouvriers éprouveraient très probablement beaucoup moins le besoin de s'associer pour le droit (...). Qui ne voit que les données industrielles, économiques, psychologiques, tous les facteurs du problème changeant et se renversant presque, la solution n'en serait plus à chercher où on la cherche d'ordinaire, et qu'il pourrait y avoir un rebroussement dans les conditions que l'évolution sociale paraissait suivre ?* ».

A l'opposé au plan idéologique, les anarchistes, tel Kropotkine, entrevoient, dans la décentralisation potentielle de l'industrie grâce aux nouvelles forces motrices, une tendance favorable à l'avènement de la future société libertaire.

L'UTOPIE SOLIDARISTE DE RUDOLF DIESEL

En 1903, Diesel publie un petit livre – quelque 120 pages d'une composition typographique serrée –, intitulé *Solidarismus, Natürliche wirtschatfliche Erlösung des Menschen*, que l'on peut traduire ainsi : *Solidarisme, Rédemption économique naturelle de l'homme.*

Sur la page de titre, un grand **S** comme **Solidarisme**, est auréolé de 6 rayons symbolisant chacun des principes moraux de la doctrine : *véracité, justice, fraternité, paix, compassion* et – principe essentiel – *amour.*

Parcourons rapidement l'architecture de cette singulière utopie, un peu tombée dans l'oubli, de cette « fratrie » sociale bâtie sur les piliers d'une nouvelle doctrine morale des mécanismes sociaux. L'exposé de ces fondements, délivré avec un étonnant souci du détail, forme la première partie de

l'ouvrage (*Essence, organisation et effets du Solidarisme*).

Un fonds communautaire de capitaux, la Caisse du peuple

Après avoir rappelé que le travail est le fondement légitime de la propriété individuelle ou collective, Diesel expose le principe de base de sa *Caisse du peuple*. Dans l'Allemagne d'alors, explique-t-il, 50 millions de gens dépendent d'un salaire. Si chacun verse un pfennig par semaine à une *Caisse du peuple*, en une semaine un capital communautaire d'un demi-million de marks est constitué. A raison de ce sacrifice infime d'un pfennig, devenu même journalier, le capital communautaire accumulé permettra de fonder un nombre croissant d'entreprises. « *Comprenez-vous le pouvoir du nombre et du temps ? Comprenez-vous que vous pouvez vous délivrer vous-mêmes, si vous utilisez correctement le nombre et le temps, le nombre par l'unité, le temps par la constance ? Mais comprenez-vous également que vous n'avez ce pouvoir que si chacun de vous, sans exception, agit pour la communauté, et que vous ne le préserverez qu'en restant une communauté fermée, c'est-à-dire unie ?* »

La gestion de la *Caisse du peuple* est confiée à un *Directoire* constitué parmi les *frères* ; on choisira des frères de confiance et d'expérience, âgés d'au moins 25 ans et nommés pour 5 ans. Ce directoire comptera un membre par demi-million de frères actifs au sein des entreprises, avec toutefois un minimum de neuf membres.

Le financement à long terme des ruches par la Caisse du peuple

Frères, c'est bien ainsi que s'appellent entre eux les cotisants à la *Caisse*. Le Directoire choisit parmi eux ceux qui paraissent les plus compétents pour gérer l'entreprise à créer, à laquelle il consent un prêt d'argent puisé dans la *Caisse du peuple* pour constituer son capital : prêt remboursable en cinquante ans, selon des taux convenus, par prélèvement sur les bénéfices de l'entreprise.

Organisée alors comme une société anonyme, l'entreprise acquiert les meilleurs outils de production et embauche comme ouvriers et cadres les plus compétents d'entre les frères. Chacun, à son tour, applique le meilleur de ses efforts et de son temps à son travail, dont le résultat final est propriété commune.

« *Cela ne vous fait-il pas penser à une ruche, où chaque abeille participe sans relâche et avec une application dévouée au travail commun, où le miel rassemblé est la propriété commune de toutes les abeilles de la ruche et constitue leur nourriture, non seulement pour le temps présent, mais aussi pour la période de l'hiver improductif ? Ne vous vient-il pas spontanément à l'esprit d'appeler une telle société une entreprise-ruche ou, en raccourci, une ruche, et ses membres des abeilles ?* »

La *Caisse* multiplie la création d'entreprises dans divers secteurs d'activité. Toutes ces sociétés appartenant au même propriétaire, la *Caisse*, c'est-à-dire en fait les frères : elles ne se font pas concurrence, mais plutôt s'entraident et échangent leurs produits. Il en résulte une meilleure qualité de vie pour les membres des entreprises et de leurs familles, qui voient leurs dépenses réduites : « *La ruche n'est pas seulement un centre de production, mais en même temps un centre complet de prestations économiques pour vous et les vôtres, de la naissance jusqu'à la mort* ».

Le contrat populaire, lien entre la Caisse du Peuple et les frères

La *Caisse du peuple* repose sur un contrat passé avec les frères membres. Ce contrat, dit *contrat populaire*, vise à la création et à l'expansion de *ruches*, ainsi qu'à l'intégration croissante des frères dans les ruches, qu'on appellera alors *abeilles*. Il établit les directives financières de la *Caisse du peuple*. La direction des affaires de la *Caisse*, c'est-à-dire l'application des décisions du contrat populaire, relève de la responsabilité du Directoire, qui est également le représentant de la *Caisse* pour les parties extérieures.

Droits et devoirs des frères

Ils sont eux aussi déterminés par le contrat populaire. « *Le contrat populaire repose sur la confiance mutuelle [...] et l'engagement des frères à faire tout ce qu'exigent les intérêts et les objectifs poursuivis par la Caisse du peuple, et à renoncer à tout ce qui pourrait impliquer des inconvénients pour la Caisse du peuple, les ruches ou les frères* ».

Les frères versent une cotisation mensuelle à la *Caisse du peuple*, la *cotisation fraternelle*, d'un montant proportionnel aux revenus du cotisant. Douze mois de cotisation fraternelle ininterrompue confèrent le statut de *frère*, et l'on peut cotiser dès l'âge de seize ans. Tous les frères ont le droit de vote concernant les différents représentants, la création de nouvelles ruches, et l'affectation des fonds de la *Caisse* afférents à ces créations.

Le contrat de travail, lien entre la Caisse du peuple et les ruches, administration et finances des ruches.

Chaque ruche adhère aux prescriptions de la *Caisse du peuple* par un *contrat de travail*. Les ruches sont autogérées par l'intermédiaire de membres élus par les abeilles et regroupés en un *comité*. Le comité rend compte aux abeilles en assemblée annuelle de ses activités ; ses membres perçoivent un revenu supplémentaire de 10 %. Chaque abeille a le droit de présenter sa candidature comme membre du comité.

Comme expliqué plus tôt, le capital de l'entreprise est fourni par la *Caisse du peuple* sous forme d'un prêt remboursable en 50 ans avec intérêts. Lors des comptes annuels, ce qui reste après remboursement du capital et des

intérêts dus, après que tous les frais engagés dans l'année et frais prévisionnels ont été couverts, constitue le bénéfice de la ruche, réparti en deux parts égales. Une première part va aux abeilles, en contrepartie de leur travail, et s'ajoute à leurs revenus fixes (dits « *revenus normaux* ») ainsi qu'aux prestations perçues en cas de maladie ou d'accident – tous ces versements étant proportionnels aux services fournis à la ruche –; l'autre part est destinée à la *Caisse du peuple* et alimente un fonds d'aide aux invalides, veuves, orphelins et personnes âgées de plus de 65 ans. Si la ruche ne fait pas de bénéfice, les frères ne perçoivent aucun supplément. Et si le bénéfice s'avère insuffisant pour couvrir entièrement les frais de cotisation maladie, invalidité, etc., c'est la *Caisse du peuple*, qui fournit l'appoint.

Les prestations sociales de la ruche

En contrepartie de cotisations obligatoires, toutes les abeilles bénéficient de nombreuses prestations sociales :

– Les unes visent à leur bien-être corporel. Ainsi, chaque ruche est dotée d'une cantine offrant « *des plats bien préparés, nourrissants et goûteux à des prix d'abeilles, ainsi que de la bonne eau potable, du thé et du café gratuits* ». Elle doit aussi proposer aux abeilles des logements sains et de qualité, également à des « *prix d'abeilles* ». Afin d'assurer l'indépendance des abeilles par rapport à la ruche, il ne sera en aucun cas possible d'acquérir ces logements. Dans le périmètre de la ruche, un hôpital devra pouvoir offrir toutes catégories de soins, et compter une maternité ainsi qu'une crèche ouverte à tous les nourrissons, légitimes ou non. Des médecins de la ruche dirigeront ces établissements et veilleront au respect de l'hygiène, tant dans l'entreprise que dans les habitations et les écoles. Les prestations médicales et les médicaments seront gratuits. Chaque ruche devra prendre le maximum de dispositions pour éviter les maladies et accidents de travail. Elle devra être équipée de douches, de piscines, de salles de sport et d'aires de jeux, et disposer de maisons de repos pour les convalescents, ainsi que de centres de colonies de vacances pour les enfants.

– D'autres prestations visent au bien-être spirituel et moral, à la sociabilité et au repos des abeilles et de leur famille. Ainsi, chaque ruche doit offrir l'accès gratuit à des crèches et des jardins d'enfants, des écoles primaires (s'il n'y en a pas assez dans le secteur ou si elles sont trop éloignées), des cours de perfectionnement (exclusivement dispensés durant la journée), des écoles ménagères pour les jeunes filles, des écoles pour le travail féminin rémunéré, destinées aux jeunes filles qui ont dépassé l'âge de la scolarité obligatoire, une école philotechnique pour adultes, une bibliothèque dotée de « *bons livres* », une salle pour les spectacles, conférences, etc...

L'ORIGINALITÉ DE DIESEL

Ce sont moins ces ruches, avec leur participation aux bénéfices ou leurs œuvres sociales, que le principe de la *Caisse centrale du peuple* et du *contrat populaire* qui constituent l'originalité du système social défendu par Diesel. Son solidarisme s'exprime en effet à travers les liens mutuels, contractuels, établis entre la *Caisse* unique centrale et les ruches locales, traduction concrète de ses deux slogans : 1/« *L'action de l'individu pour la communauté, La protection de la communauté pour l'individu* » et 2/« *Le Solidarisme est une philanthropie organisée dotée d'un but précis, c'est la solidarité traduite en actes. Le Solidarisme trouve dans la coopération entre Caisse du peuple et ruches son entière réalisation pratique.* »

Cette doctrine repose sur un postulat sociologique : « *Les magnifiques résultats prévus ne font que découler d'une idée fondamentale unique, l'idée de l'appartenance de tous les hommes à la même communauté, de l'unité de la société humaine, de l'unicité et du caractère commun de ses intérêts, du sentiment dont on a pris conscience que tout ce qui est utile ou nuit à la communauté est utile ou nuit à l'individu, car l'individu est partie de la communauté, en un mot, l'idée de la « solidarité » entre tous les hommes* ».

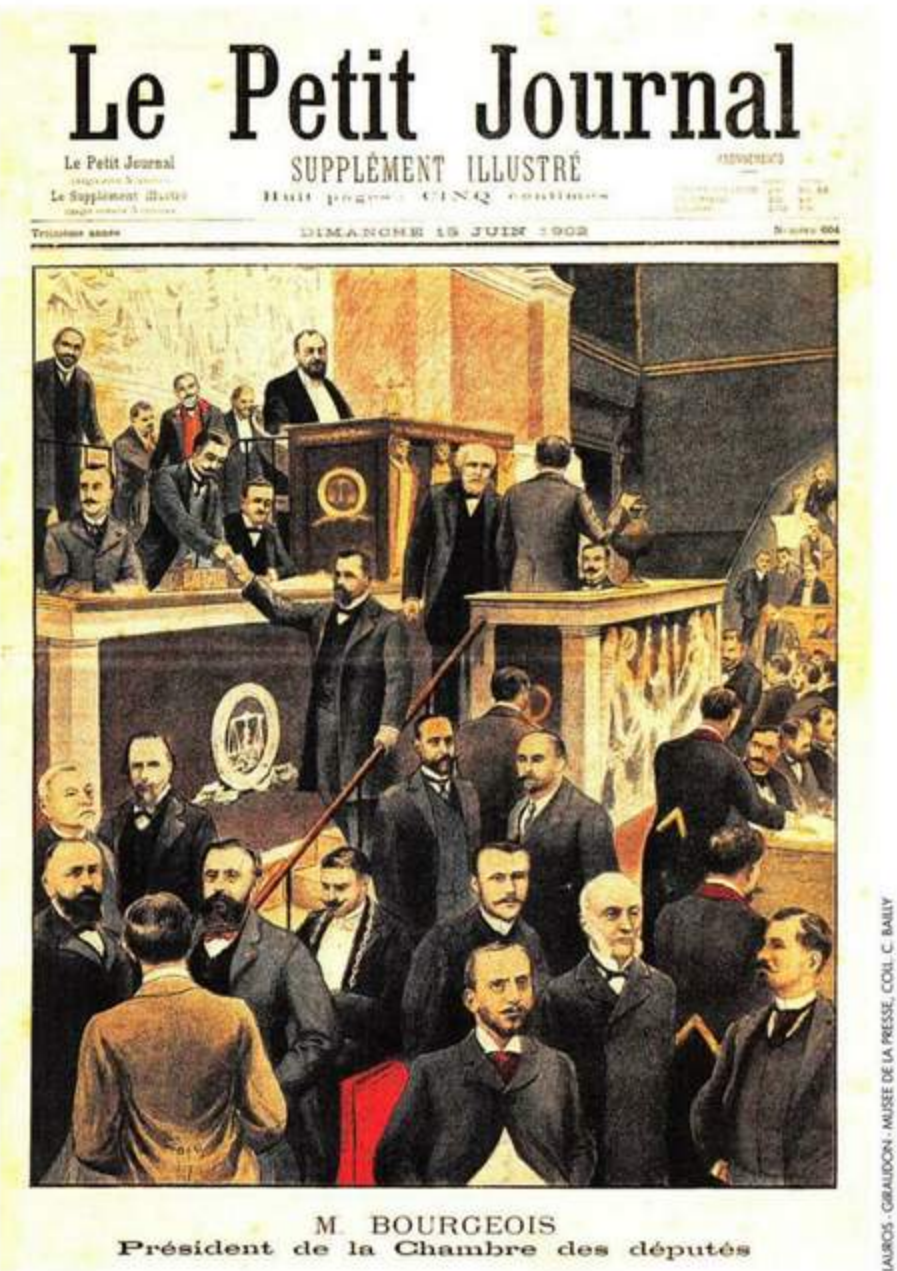
A ce titre, Diesel participe au large mouvement d'idées regroupé sous la bannière du solidarisme sociologique. Largement inspiré par les nouvelles doctrines organicistes du monde vivant, ce mouvement rompt avec les théories darwiniennes de la lutte pour la survie. Tout comme entre les organes et le corps, il y a solidarité entre chaque individu et sa communauté biologique d'appartenance, l'espèce. La rupture avec les lois de la lutte biologique, qui légitimaient celles de la concurrence sociale, permet au solidarisme de défendre une « troisième voie » entre le libéralisme sauvage dominant et le spectre d'un collectivisme étouffant : « *Il y a entre chacun des individus et tous les autres un lien nécessaire de solidarité. C'est l'étude exacte des causes, des conditions et des limites de cette solidarité qui, seule, pourra donner la mesure des droits et des devoirs de chacun envers tous et de tous envers chacun, et qui assurera les conclusions scientifiques et morales du problème social* », énonçait le pontife français du solidarisme, Léon Bourgeois, dans son livre-manifeste paru en 1896, *Solidarité*. Ce livre a connu un grand retentissement et emporté l'adhésion de nombreux intellectuels, tels Durkheim, Fouillée ou Bouglé. Le modèle de Bourgeois est même devenu la doctrine quasi officielle du Parti radical, en quête de distinction programmatique par rapport à ses deux ailes opposées, libérale et socialiste...

Diesel a bien lu et annoté l'ouvrage de Bourgeois, y reconnaissant ses

En 1896, Léon Bourgeois publie son livre-manifeste : *Solidarité*. Il inspirera l'essentiel des doctrines du parti radical.

idées qu'il aurait, affirme-t-il, conçues indépendamment. Mais il ne s'est pas tenu à de simples spéculations philosophiques, il leur a donné une traduction concrète originale, à la manière des utopistes sociaux français dont il a pu s'inspirer : Fourier et ses phalanstères industrieux, Proudhon et son crédit gratuit offert aux associations ouvrières de production par les Banques du peuple, Louis Blanc et ses ateliers nationaux, collectivisés et planifiés.

On retrouve en Diesel la vocation de l'ingénieur à concevoir aussi bien une nouvelle machine qu'à tracer les plans de la cité sociale idéale, en vertu de son rationalisme passe-partout, appliqué tant au domaine technologique qu'à l'espace social. Au lecteur attentif de *Solidarismus*, Diesel rappelle qu'il doit bien se convaincre que « *tout est développé et calculé de manière strictement logique et numérique à partir de la vie et des faits. Chaque chose est pratiquement faisable* »...


Le Petit Journal
SUPPLÉMENT ILLUSTRÉ
DIMANCHE 15 JUIN 1902

M. BOURGEOIS
Président de la Chambre des députés

LAUROS - GIRAUDON - MUSÉE DE LA PRESSE, COLL. C. BAILLY

L'IMAGE CONTESTABLE DE LA RUCHE...

L'argumentation solidariste utilise souvent les abeilles comme référence privilégiée dans le monde animal. Fondateur du monisme énergétique, Wilhelm Ostwald, en relation avec Diesel, consacre en 1910 le dernier chapitre de son ouvrage de doctrine à esquisser une *énergétique sociologique*. On y retrouve d'une part l'orientation solidariste : tandis que la quantité d'énergie dont dispose l'humanité (énergie solaire et énergie accumulée sur terre sous forme de charbon) est limitée, « *le bien-être des hommes est en proportion de la part d'énergie qui revient à chacun d'eux* ». D'autre part, on n'évite pas la référence obligée à la ruche : « *quoique chaque abeille semble organisée de façon à pouvoir vivre par elle-même, son existence n'en est pas moins liée à celle de la ruche. Sans la reine, qui pond les œufs, elle ne serait pas née ; sans les soins des ouvrières, elle ne se serait pas développée, et, si elle ne succombe pas dans la lutte pour la vie, c'est parce que, faisant sa part de travail dans la demeure commune, elle prend sa part des avantages communs* ». Et preuve du solidarisme de la nature, alors que la ruche peut subsister quand une partie de ses habitants la quitte pour former un nouvel essaim, « *l'individu qui la quitte ne peut plus subsister* ».

Kropotkine, l'auteur de *Mutual Aid* (1902), correspondant avec Diesel en 1903, s'étend longuement sur le travail en commun des abeilles et leur entraide dans la ruche ; s'il existe bien des abeilles préférant une vie de pillage à la vie laborieuse des ouvrières, elles sont néanmoins élimi-

nées, « *car à la longue la pratique de la solidarité se montre bien plus avantageuse pour l'espèce que le développement des individus doués d'instincts de pillage* ».

Cette référence au modèle de la ruche est toutefois contestée par le docteur Papillault, partie prenante en France aux débats sur le solidarisme : « *Trop longtemps citée comme un idéal, la société des abeilles nous offre, au contraire, l'exemple d'un état social inférieur et inique (...). La nécessité d'assurer avant tout la survivance de l'espèce a amené la déchéance des ouvrières, asservies, atrophiées, sans individualité, n'ayant conservé de l'instinct maternel que ce qu'il en fallait pour élever la postérité de la reine* »...

I. TANGRE - JACANA

Cette critique rejoint celle que l'on porta au projet de Diesel, jugé autoritaire et contraignant pour ses *abeilles* : leur initiative individuelle se trouvait bridée dans les *ruches*, alors que par ailleurs celles-ci n'échappaient pas à la direction centralisée de la *Caisse du peuple*. Le caractère « fermé » de cette *Caisse*, défini par Diesel comme condition *sine qua non* à son succès, fut estimé totalitaire par beaucoup.

Un tel projet de pacification tente de conjuguer, autour de la quête d'une voie médiane, conservatisme social et gouvernement des élites techniques. Il est tout à fait symptomatique de l'idéologie de l'ingénieur, qui, en position charnière entre le marteau et l'enclume, peut prétendre s'ériger en démiurge social et transcender les antagonismes de classe pour forger une nouvelle cité du travail, harmonieuse. A deux reprises, la pensée de Diesel se révèle tout à fait exemplaire de ce penchant idéologique naturel de l'ingénieur vers les panacées technologiques et le réformisme social [2] : du nouveau moteur révolutionnaire salvateur à la cité sociale planifiée réconciliant harmonieusement le capital et le travail, les clefs de la question sociale lui appartiendraient. Une prétention toujours démentie dans les faits...

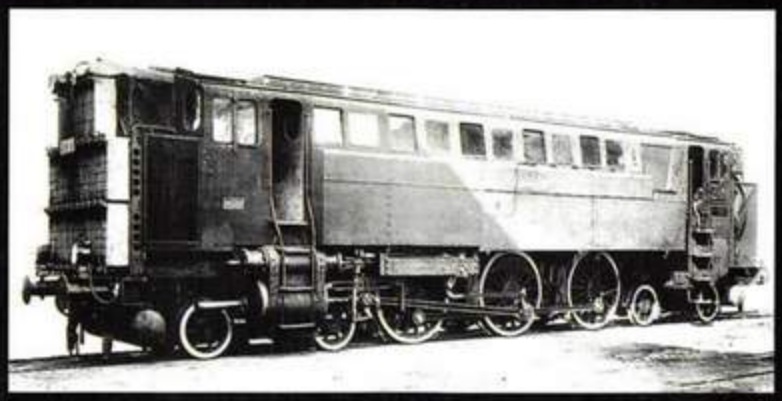
L'histoire est singulièrement cruelle pour Diesel lui-même. Dès la signature de ses premiers contrats avec la société d'Augsburg et Krupp, il insiste en effet pour que figure une clause de réciprocité ou de *solidarité* : chacune des parties s'engage ainsi à faire bénéficier les autres des améliorations qu'elle pourrait découvrir dans le futur développement du moteur. Plus tard, une clause du même type est incluse dans tous les contrats de licence signés par Diesel avec des sociétés étrangères. Elle est alors présentée comme un atout original. Ainsi, en octobre 1897, le colonel américain E.D. Meier, envoyé en Allemagne pour expertise par son patron, le brasseur Adolphus Busch, écrit : « *La politique libérale [...], introduite par Mr Diesel pour faire en sorte que tous les licenciés échangent leur expérience et leurs inventions, assure un développement rapide dans chaque domaine où régnait jusqu'alors le moteur à vapeur.* » Busch paye 1 million de marks le droit de fabriquer des moteurs Diesel aux Etats-Unis et s'engage à verser des royalties de 6 % par moteur vendu...

Quelques années plus tard, le vent tourne. Les difficultés techniques sont telles que chaque licencié attend avec impatience les plans des améliorations apportées par les uns ou les autres. Or, la société M.A.N. se fait de plus en plus réticente à ce partage... En France, le gouvernement fait pression sur le licencié national, qui développe des moteurs à destination militaire, pour ne pas diffuser ses plans. En octobre 1902, le colonel Meier écrit à Diesel pour se plaindre de ces manquements répétés à la clause de solidarité. Il menace de rompre son contrat et de demander des dommages et intérêts. A la même époque, le licencié anglais dresse un constat peu différent : « *Il nous semble que toutes les sociétés fabriquant des moteurs Diesel ne recherchent que leur propre intérêt et ne tiennent pas leurs engagements.* »

Quelque temps plus tard, Diesel se voit intenter des procès à répétition pour non-respect de la clause de solidarité... Par un violent effet de boomerang, l'application pratique de sa théorie sociale est devenue l'une des causes de sa ruine. ■

2 – Pour en savoir plus sur ce sujet, cf G. Ribeill, *Inventer au XIXe siècle, Ingénieurs et ouvriers créateurs*, Culture Technique, n° 8, juin 1982, numéro spécial Création, travail, industrie, pp. 217-243 ; *A propos des écrits extraordinaires des ingénieurs*, Culture Technique, n°12, mars 1984, numéro spécial Les ingénieurs, pp. 273-279.

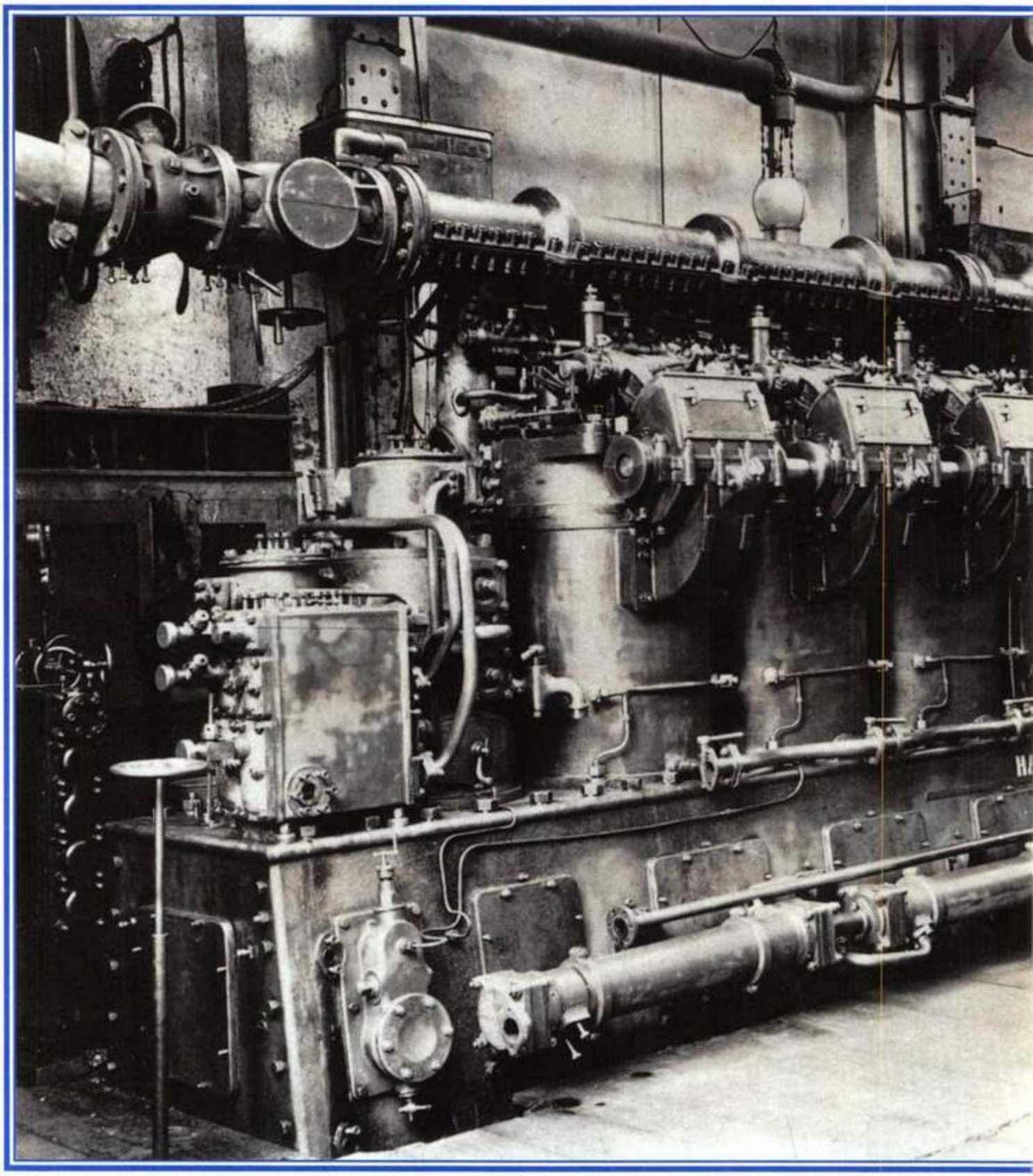
NAISSANCE D'UNE INDUSTRIE



Ce qui devait être un petit moteur commence sa carrière en grossissant beaucoup. Installés en ateliers, les moteurs Diesel servent à faire tourner des machines-outils. Mais c'est surtout dans la marine qu'ils vont être utilisés, en particulier à bord des sous-marins. Après la Première Guerre mondiale, ils propulsent des locomotives, puis des poids lourds. Les applications à l'automobile ne commenceront à se développer que dans les années 1970, après que les ingénieurs auront enfin trouvé le moyen de les rapetisser et de les alléger.

DEUTSCHES MUSEUM MÜNCHEN

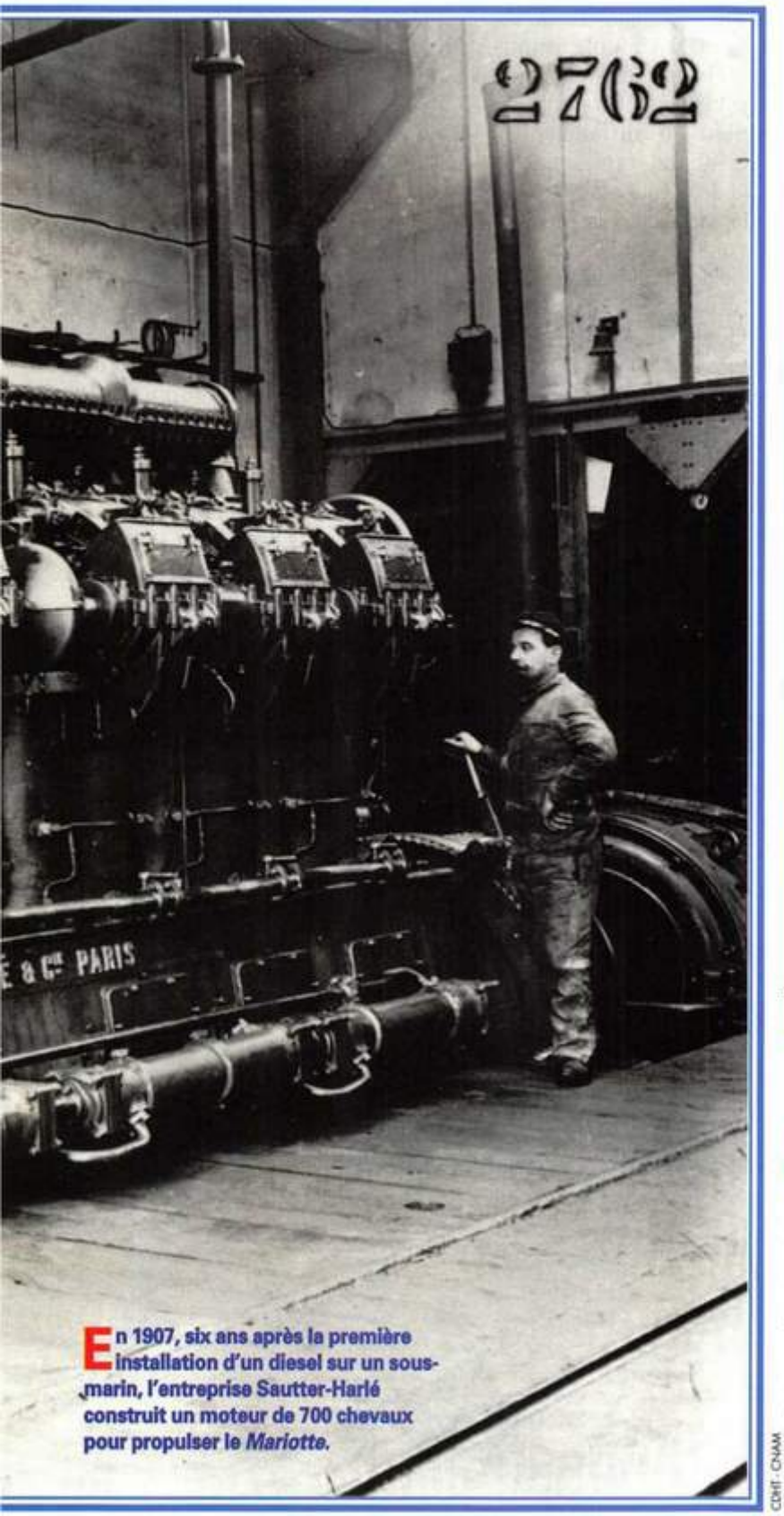
CONFLUENCE SOU



US LA MER

D'un côté, un nouveau type de bâtiment de guerre dont nul ne peut alors estimer l'efficacité réelle. C'est qu'il est encore propulsé à la vapeur, donc repérable de loin à ses volutes et à la taille de sa cheminée, et qu'il lui faut du temps pour plonger. De l'autre, un moteur en mesure de l'affranchir de ces contraintes. De cette rencontre naît, au début du siècle, un nouvel objet technique : le sous-marin Diesel.

PAR PHILIPPE MASSON



En 1907, six ans après la première installation d'un diesel sur un sous-marin, l'entreprise Sautter-Harlé construit un moteur de 700 chevaux pour propulser le *Mariotte*.

CDHT - CNAM

C'est d'abord dans l'industrie et la Marine que s'impose le moteur Diesel. La première l'utilise pour le fonctionnement de ses machines fixes, la seconde, pour la propulsion de ses sous-marins et bateaux. En revanche, il faudra attendre les années 1930 pour que le moteur Diesel gagne le transport ferroviaire, puis automobile.

A la fin du XIXe siècle, les sous-marins sont propulsés par une machine à vapeur ou par un moteur à essence. Deux pays s'intéressent tout particulièrement à la mise au point de ce nouveau bâtiment de combat : les Etats-Unis et la France.

Outre-Atlantique, l'ingénieur John P. Holland

multiplie les prototypes. Il joue la carte du petit sous-marin pur, dérivé de la torpille automobile, dont la coque emprunte la forme d'un cigare. Comme ses confrères, Holland se heurte à un obstacle majeur, l'utilisation d'un moteur unique. Si le moteur à explosion ou la machine à vapeur fonctionnent parfaitement en surface, ils ne sont pas adaptés à l'immersion. Impossible, en effet, d'acheminer de l'air frais à l'intérieur du bâtiment et de rejeter en surface les gaz d'échappement. Pour résoudre l'épineux problème, Holland équipe son sous-marin d'une double propulsion : un moteur électrique pour la plongée, un moteur à explosion pour la marche en surface et la recharge des batteries. Dès lors, tous les sous-marins bénéficieront de cette installation.

En France, les recherches suivent sensiblement la même voie. Celle du sous-marin pur, caractérisé par une coque cylindrique et une flottabilité assez faible. Un certain Maxime Laubeuf, jeune ingénieur du génie maritime, en accélère brusquement le cours. Répondant à un concours lancé en 1896 par le ministre de la Marine, il présente un submersible à double coque, baptisé *Narval*. La coque interne, épaisse, permet au bâtiment de résister aux pressions de l'immersion. Elle se trouve enfermée dans une coque externe, celle d'un torpilleur d'une centaine de tonnes. Cette dernière stabilise le sous-marin. Les ballasts occupent l'espace entre les deux coques.

L'audace de la formule suscite les critiques les plus acerbes. Pourtant, celle-ci ne tardera pas à s'imposer, et ce jusqu'à la fin de la Seconde Guerre mondiale. L'un des principaux avantages du *Narval* réside dans son coefficient de flottabilité, supérieur à 40 %, lui assurant une très bonne tenue à la mer. D'autre part, sa double propulsion – moteur électrique et machine à vapeur – en fait un bâtiment naviguant habituellement en surface, mais capable de s'immerger en cas d'attaque ou de menace. Cette dernière opération demande toutefois une vingtaine de minutes... un temps qui limite quelque peu l'intérêt même du sous-marin ! On réussira par la suite à le réduire à 11 minutes, voire 5 sur les modèles ultérieurs.

En dépit de leurs innovations, les deux systèmes possèdent de nombreuses imperfections. Le bât blesse tout particulièrement au niveau du mode de propulsion. Dans le cas du moteur à essence, adopté au départ par plusieurs pays, la puissance ne dépasse pas les 50 chevaux. Ce qui le rend inadapté aux sous-marins déplaçant plus de 100 tonnes. Autre défaut non négligeable : les risques d'explosion ou d'incendie, dont certains équipages font la triste expérience.

En dépit d'une vitesse et d'un rayon d'action supérieurs au moteur à essence, la machine à vapeur n'est guère plus satisfaisante. Les manœuvres à effectuer avant la plongée sont extrêmement complexes : il faut éteindre les feux de la chaudière, obturer toutes les ouvertures, débrayer la machine à vapeur, mettre en marche le moteur électrique... avant de pouvoir ouvrir les purges d'introduction de l'eau dans les ballasts. Sans compter avec la totale indiscrétion du bâtiment en surface : la cheminée télescopique arbore un impressionnant panache de fumée, de laquelle jaillissent parfois des gerbes d'étincelles.

Laubeuf entreprend alors de changer de moteur... Il songe à un nouveau modèle qui vient tout juste d'être commercialisé : le diesel. Pour l'heure, on l'utilise exclusivement comme moteur fixe dans quelques usines. En 1901, Laubeuf inaugure l'*Aigrette*, le premier sous-marin au monde doté d'un moteur Diesel. Celui-ci, fortement inspiré des moteurs allemands de la MAN, a été construit par la *Compagnie française des moteurs à gaz et des constructions mécaniques*. D'une puissance de 160 chevaux, à 400 tours/minute, il peut propulser le bâtiment qui pèse 179 tonnes en surface. Un moteur électrique le relaie en plongée. Le diesel comporte de nombreux avantages. Comparé à la machine à vapeur, sa manipulation est plus aisée.

MUSEE DE LA MARINE

En 1901, le Français Laubeuf lance l'*Aigrette*, le premier sous-marin doté d'un moteur Diesel. Celui-ci est relayé en plongée par un moteur électrique.

Par ailleurs, l'air nécessaire à son fonctionnement emprunte un conduit moins visible que la cheminée télescopique. Comparé au moteur à essence, sa consommation de combustible est moindre et les risques d'explosion réduits.

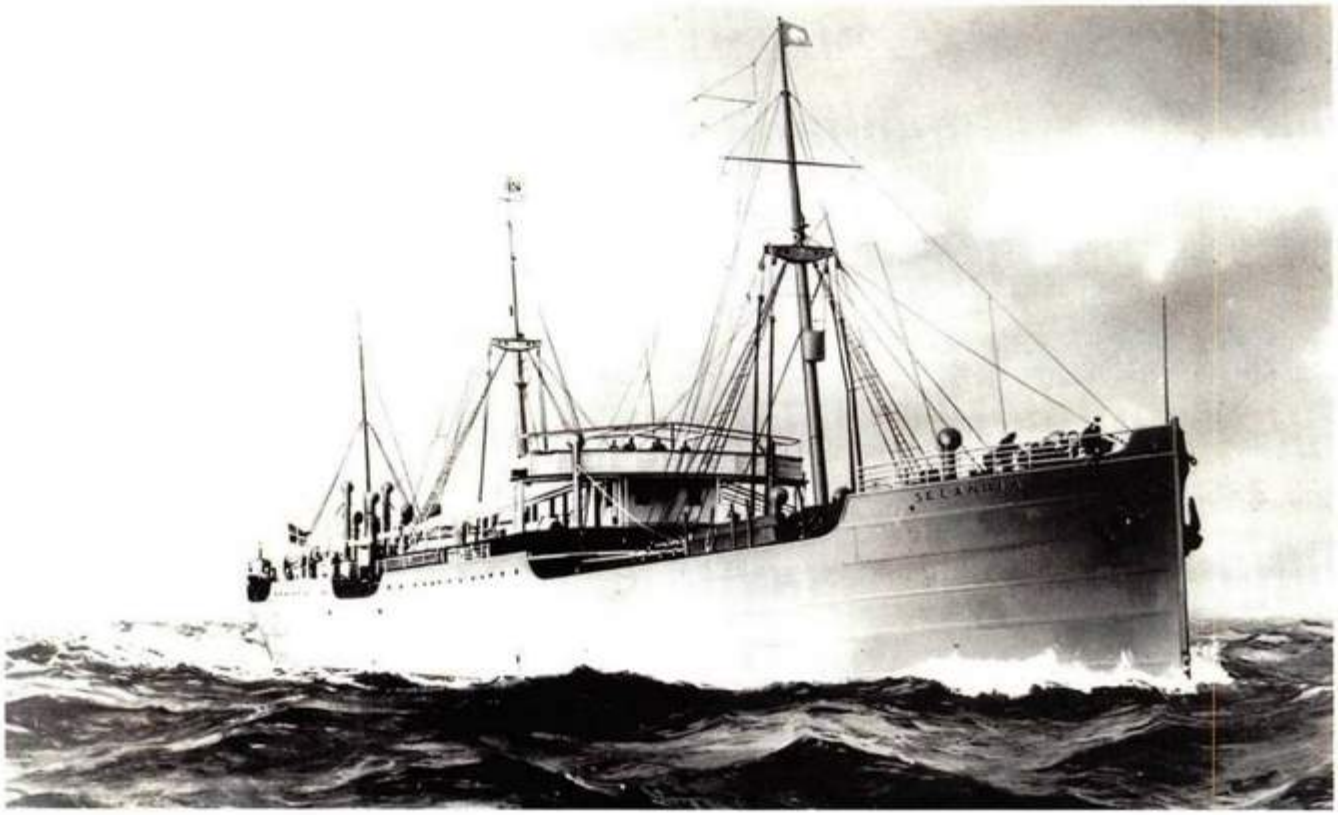
Les ingénieurs de génie maritime réservent un accueil assez froid au sous-marin diesel. La plupart d'entre eux préfèrent rester fidèles à l'ancien modèle, propulsé par la machine à vapeur ou le moteur à essence. S'ils tentent parfois des solutions audacieuses, celles-ci restent sans lendemain. L'une d'entre elles sort toutefois du lot. Il s'agit de la « propulsion électrique », mise au point par l'ingénieur Romanzotti. Ce dernier équipe des petits bâtiments de 78 tonnes avec un moteur à essence de type Krebs. Il actionne deux groupes électrogènes, ce qui permet de recharger des batteries tout en assurant une marche à allure réduite en surface . Ainsi, le sous-marin fonctionne en permanence sur le moteur électrique. Avantages : moins de vibrations et une marche plus régulière. La formule fait des émules, puisqu'on la retrouve à bord du charbonnier américain d'escadre *Jupiter*, en 1914, associée à une machine à vapeur. Et plus tard, au début de la Seconde Guerre mondiale, combinée à des diesels sur les sous-marins de 1500 tonnes de l'US Navy.

Vapeur, essence, diesel... le choix de la Marine française n'est pas définitive-

ROGER-VIOLLET

A l'époque où le *Mariotte* (ci-dessous) entre en service (voir photo en page 77), la Marine française n'a pas encore renoncé à la vapeur. (ci-contre, le *Ventôse* en 1910).

MUSÉE DE LA MARINE



DEUTSCHES MUSEUM MÜNCHEN

ment arrêté. Elle lance ainsi, à la même époque (1905-1906), deux séries de submersibles 400/550 tonnes, les *18 Pluviose* et les *16 Brumaire*. Les premiers sont encore dotés de machines à vapeur alors que les seconds fonctionnent au diesel. Le maintien de la propulsion à vapeur s'explique moins par un conservatisme excessif que par l'absence d'une véritable industrie du diesel. On se heurte à une pléthore de fabricants, qui hésitent entre les versions à deux temps et quatre temps. Une telle dispersion complique l'entretien et la formation du personnel. Il en résulte que les moteurs sont mal éprouvés, fragiles et délicats à mettre au point. Leurs performances déçoivent. Enfin, les conflits qui règnent entre les différents ingénieurs contribuent encore à faire des sous-marins français une « flottille d'échantillons ». Cette situation va persister jusqu'à la Première Guerre mondiale.

Les autres puissances européennes se montrent plus réservées à l'égard du sous-marin. La Grande-Bretagne continue de privilégier le sous-marin à coque cylindrique, dont la flottabilité a été améliorée. Dès 1908, elle choisit de commander tous ses moteurs diesels à un seul fabricant, la firme Vickers. Ce qui lui procure un ensemble fiable et homogène.

En 1912, le diesel fait son entrée dans la marine marchande. Il propulse le *Selandia*, cargo danois de 10 000 tonnes.

On sait l'importance que l'Allemagne a accordée au sous-marin pendant les deux guerres mondiales. Mais elle lui manifeste d'abord une certaine indifférence. Une telle attitude provient de toute évidence de l'Amiral Tirpitz, alors ministre de la Marine. Il se méfie de ce bâtiment encore expérimental. De surcroît, sa construction risquerait d'entraver le développement de la Flotte de haute mer.

Ce n'est que le 30 août 1905 que le premier sous-marin allemand, le U-1, est lancé au chantier Germania, à Kiel. Les douze premiers bâtiments, encore dotés de moteurs à pétrole Krebs pour la marche en surface, se révèlent assez médiocres. Les séries suivantes rattraperont ce mauvais début. Il s'agit de bâtiments de 550/700 tonnes et 700/900 tonnes, pourvus d'excellents diesels. Leur vitesse – élevée pour l'époque – atteint 16 nœuds.

En 1914, on dénombre près de 400 sous-marins en service dans le monde. Grâce aux diverses améliorations qui lui sont apportées, le moteur Diesel développe des puissances de 1200 à 1600 ch... une qualité qui l'impose définitivement à bord de ces bâtiments. De fait, l'ère des sous-marins à vapeur a pris fin depuis déjà quatre ans. Seule la Grande-Bretagne effectuera une dernière tentative en 1917, afin d'obtenir des sous-marins d'escadre capables de filer 25 nœuds, et d'accompagner ainsi les navires de ligne en haute mer. Une performance encore hors de portée des diesels les plus rapides.

Loin de se limiter à la propulsion des sous-marins, le moteur à combustion interne fait son entrée, à la même époque, dans les marines marchandes. C'est un cargo mixte danois de 10 000 tonnes, le *Selandia* (destiné aux relations avec l'Extrême-Orient) qui reçoit en 1912 le premier diesel. L'année suivante, l'Allemagne se lance à son tour dans la construction de cargos à propulsion diesel. Les Pays-Bas, la Grande-Bretagne et les Etats scandinaves font de même. Tous ces pays ont vite pris conscience des avantages de la combustion interne. Au premier plan : la réduction considérable de l'encombrement comparé à celui de la machine à vapeur. On la doit tant à la disparition des chaudières qu'aux importantes

économies de poids et de volume du combustible à transporter. A bord du *Selandia*, la consommation par cheval et par heure ne dépasse pas les 175 grammes de mazout au lieu des 450 grammes de charbon dans les installations à vapeur. S'ajoutent l'économie – non négligeable – du poids de l'eau nécessaire au refroidissement des chaudières, ainsi qu'une réduction du personnel. Tout cela compense largement les quelques inconvénients inhérents au diesel : un prix plus élevé qu'un ensemble vapeur, l'utilisation d'un combustible noble, la présence de vibrations, des réparations plus délicates à effectuer que sur la machine à vapeur.

Bien que prometteurs, les débuts des cargos au diesel sont timides : en 1914, de tels bâtiments ne représentent encore que 0,4 % du tonnage mondial.

Le moteur acquiert ses lettres de noblesse pendant la guerre, en montrant sa fiabilité et son endurance à bord des sous-marins allemands. Au lendemain du conflit, il effectue une véritable percée. Les modèles se multiplient. Deux ou quatre temps, à simple ou à double effet, lents à attaque directe ou rapides... Dès lors, l'éventail des applications du diesel s'ouvre à tous les bateaux qui exigent une vitesse courante de 16 à 25 nœuds : cargos, bâtiments mixtes, paquebots économiques... Seuls les bâtiments de guerre ou les paquebots rapides fonctionnent encore à la vapeur, associée à la turbine. En 1939, 25 % des navires en service et 65 % des unités en construction sont dotés d'un moteur à combustion interne. Le diesel commence à éclipser la machine à vapeur.

Cette mutation touche également le transport ferroviaire. Bien que la première locomotive diesel fut réalisée en 1912, le moteur à combustion interne, en même temps que la traction électrique, ne remplace la locomotive à vapeur que dans les années 1930. Le succès du nouveau mode de traction grandit rapidement. On assiste en moins de 25 ans à la « diésélisation » d'une grande partie du trafic ferroviaire mondial. Le processus débute avec des machines de 50 à 500 ch, essentiellement utilisées pour les manœuvres en gare. Elles conquièrent rapidement les lignes secondaires à faible trafic. En marge de ces premières réalisations peu puissantes, l'Allemand Lomonossov met à profit les performances des moteurs de sous-marins pour réaliser une locomotive diesel de 1200 ch, à transmission électrique.

Dix ans plus tard, le diesel rapide équipe les trains automoteurs à grande vitesse comme le *Triebwagen* de la Reichsbahn. Il contribue également au succès des autorails que l'Allemagne, les Pays-bas ou la France utilisent sur certaines voies ferrées secondaires ou transversales.

A partir de 1935, on est capable de construire des machines de plus de 2000 ch. Associées en deux ou trois éléments, elles assurent le service de grands convois de marchandises ou de trains de voyageurs rapides. La formule rencontre un grand succès aux Etats-Unis. La traction diesel ne va d'ailleurs pas tarder à l'emporter définitivement sur la vapeur, et même sur la traction électrique. Une victoire qui tient aux particularités du réseau ferroviaire américain. En effet, ses grandes distances, souvent à voie unique, empruntées par des convois lourds et peu fréquents, se prêtent mal aux installations fixes fort coûteuses de la traction électrique.

L'Europe se montre plus réticente à la diésélisation de ses chemins de fer. Si le moteur contribue également à éliminer la vapeur, il ne parvient pas à s'imposer sur les lignes à fort trafic. L'électrification y reste souveraine, ne serait-ce qu'en raison du potentiel hydroélectrique de certains pays comme la Suisse, l'Italie ou la France. Par ailleurs, le diesel présente un certain nombre d'inconvénients qui freinent son expansion. Le coût d'une machine équipée d'un moteur diesel dépasse celui d'une locomotive électrique ou à vapeur. Et le moteur à combustion interne ne développe sa puissance qu'entre certaines limites de vitesse. Cela rend la locomotive incapable de monter certaines rampes. Aussi est-il nécessaire d'intégrer entre l'arbre des moteurs et les essieux une transmission à démultiplication variable. Plusieurs systèmes de transmission sont mis au point en fonction de la puissance des moteurs : mécanique pour les machines de 25 à 500 ch, hydraulique pour des valeurs un peu plus élevées, électrique pour les puissances supérieures à 500 ch. Les moteurs électriques accouplés aux essieux sont alimentés par un groupe électrogène comportant une génératrice à courant continu. Le système est efficace, quoique lourd et coûteux. Le poids de la transmission finit par dépasser celui du moteur lui-même.

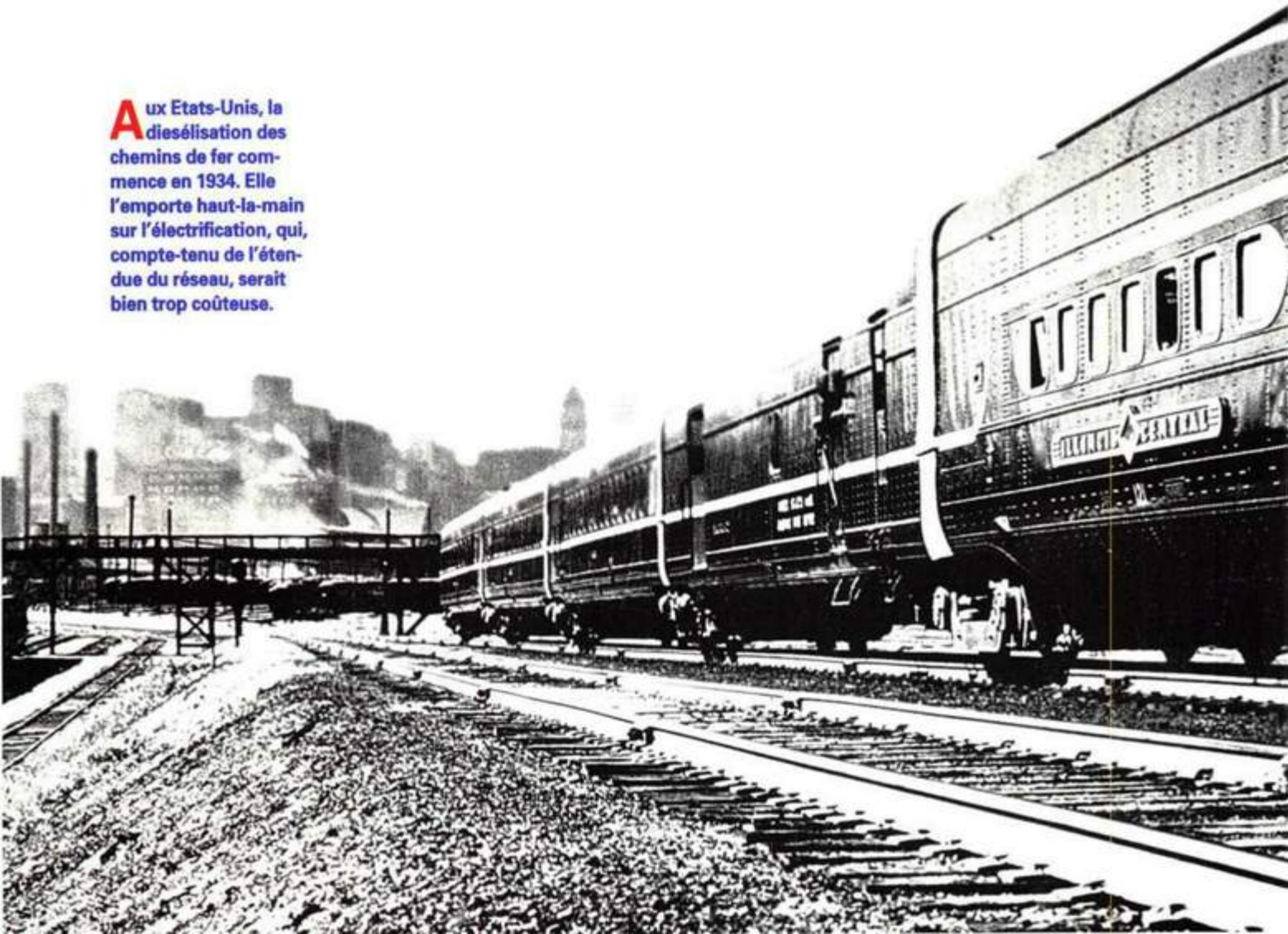
En contrepartie, le diesel a un rendement avoisinant les 28 % ... Rien à voir avec celui d'une machine à vapeur qui atteint péniblement 12 %. On doit cette amélioration technique à l'adoption d'un turbocompresseur, branché sur l'admission d'air des diesels à quatre temps. Autres atouts : la facilité d'arrêt et de mise en marche, l'absence de consommation d'eau, la faiblesse de la consommation de gas-oil, une conduite facile, des révisions tous les 500 000 km seulement, et enfin la facilité de ravitaillement en combustible. Ainsi, une machine diesel peut parcourir plus de 1000 km sans s'arrêter alors qu'une locomotive à vapeur doit être ravitaillée tous les 150 à 300 km.

Depuis ses premiers succès à bord des sous-marins, le diesel n'a cessé de conquérir de nouveaux domaines. Le train, dans les années 30, l'automobile quelques décennies plus tard. Un seul mode de transport lui échappe encore, en raison de son poids et de son encombrement : le transport aérien. ■

Une lente mont

Commercialisé dès 1897, le diesel connaît une enfance mouvementée. Techniques ou économiques, de nombreux obstacles ralentissent sa diffusion dans le monde industriel. Il lui faudra près de quarante ans pour conquérir sa place parmi les autres moteurs ...

PAR EMMANUEL CHADEAU



Aux Etats-Unis, la diesélisation des chemins de fer commence en 1934. Elle l'emporte haut-la-main sur l'électrification, qui, compte-tenu de l'étendue du réseau, serait bien trop coûteuse.

ée en puissance

UNE LENTE MONTÉE EN PUISSANCE

Navires, camions, autobus, autocars, locomotives, tracteurs agricoles... Autant de domaines où le moteur Diesel tient aujourd'hui une place de choix. Sans compter les voitures particulières dont près de la moitié des nouveaux modèles fonctionnent, en France, au gas-oil.

La diffusion du moteur Diesel n'a pourtant pas été aussi rapide que l'auguraient ses débuts. Commercialisé à la fin du XIXe siècle, le moteur n'entrera vraiment dans l'univers quotidien des hommes qu'à partir de la Seconde Guerre mondiale. C'est-à-dire lorsqu'il équipera les trains de passagers et les voitures de tourisme. Auparavant, il aura conquis les industries lourdes et la navigation (voir article p. 76).

1897. Le diesel est lancé. Ses principaux atouts – un rendement net plus élevé que ceux de la machine à vapeur et du moteur à essence ; une consommation de plusieurs types de combustibles, de surcroît moins dangereux que l'essence – devraient lui procurer sans tarder de nombreuses applications. On pense pouvoir l'utiliser par exemple sur les chantiers de bois et de construction, en Russie et en Scandinavie. Ou encore sur les bateaux de pêche, contraints jusqu'ici de se ravitailler en charbon pour alimenter leur moteur auxiliaire. Autre cible potentielle : les coopératives agricoles, surtout laitières, qui commencent à s'équiper de machines automatiques. Ces dernières seraient susceptibles de fonctionner avec un diesel. Enfin, les multiples installations agricoles ou industrielles qui fleurissent à travers les grandes plaines des Etats-Unis.

Mais divers facteurs, tant techniques qu'économiques, vont détourner le moteur Diesel de ses vocations premières.

De quelles sources d'énergie dispose-t-on en cette fin de XIXe siècle ? La machine à vapeur est encore présente dans de nombreux domaines : usines, navires, transport ferroviaire.... Elle commence cependant à être concurrencée par le moteur à essence.

Celui-ci prend son véritable essor à partir de 1885. En 1889, les constructeurs allemands Daimler et Maybach réalisent le premier moteur rapide (à haute vitesse de rotation). Ils l'installent sur une automobile conçue par Maybach. C'est la première voiture moderne équipée d'un moteur à combustion interne. C'est également le coup d'envoi de la production des moteurs à essence à l'échelle industrielle. En 1890, Panhard et Levassor achètent la licence Daimler. Ils deviennent les pionniers de la construction automobile en France, et commercialisent leur production à travers le monde.

Dès lors, le moteur à essence connaît une diffusion rapide et exponentielle. Outre une technologie aboutie, il bénéficie du développement de l'industrie du raffinage. Depuis les années 1880, on sait en effet tirer du pétrole des produits légers. D'abord utilisés pour l'alimentation des lampes et la lubrification des machines, ils vont vite servir de carburant à ce nouveau moteur. De fait, celui-ci est installé dans le paysage industriel depuis une bonne dizaine d'années, lorsque le diesel y fait son entrée.

Pour percer, ce dernier se doit d'être plus performant – ou mieux adapté à certains domaines – que son concurrent. Les premiers modèles semblent pouvoir répondre à ces exigences. Notamment parce que leur rendement net s'annonce bien supérieur à celui des moteurs à essence. Mais leur mise en service démontre très vite qu'ils sont, pour l'heure, incapables de tenir leurs promesses. D'autres facteurs vont encore contribuer à retarder la diffusion du diesel. Moteurs à essence – et machines à vapeur – vont conserver leur suprématie dans de nombreux secteurs.

Quelles sont les raisons précises de cet ajournement ? Au premier plan sont souvent évoqués les obstacles techniques. En effet, ceux-ci apparaissent très rapidement après la commercialisation du premier moteur Diesel, un deux cylindres d'une puissance de 60 ch. Il montre plusieurs faiblesses : les pièces résistent mal aux hautes pressions, le pulvérisateur s'encrasse facilement, l'injection pneumatique provoque des explosions, et le rendement varie beaucoup en fonction du combustible utilisé. Les constructeurs des moteurs à essence ont certes rencontré des difficultés du même ordre (notamment au niveau du carburateur et du système d'allumage). Mais elles sont en grande partie résolues lorsque le moteur Diesel arrive à son tour sur le marché.

Ces défaillances techniques vont faire hésiter de nombreux constructeurs. Ce n'est pourtant pas faute de s'être intéressés au nouveau moteur. Dès 1897, des licences de construction sont accordées à plusieurs compagnies allemandes et étrangères. Le succès « médiatique » du diesel – qui figure parmi les vedettes de l'Exposition internationale de Munich – conforte les constructeurs dans leur choix. Mais les échecs successifs des premiers modèles vont en décourager un certain nombre, matériellement incapables de les surmonter. Seule la persévérance des firmes les mieux averties, comme la MAN, Sautter-Harlé ou Sulzer, va permettre au diesel de franchir, en quelques années, ce mauvais cap.

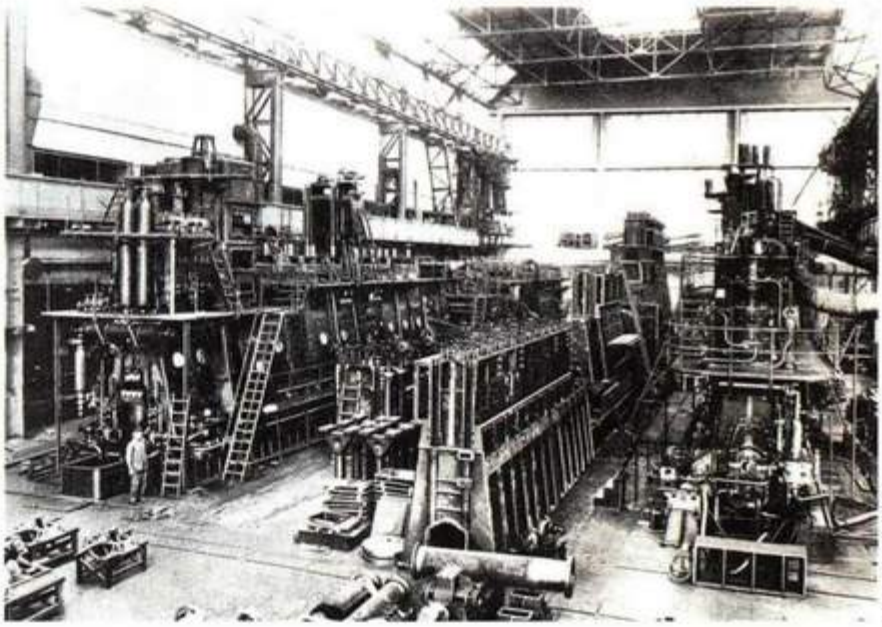
Vers 1901, les difficultés inhérentes à la jeunesse du moteur sont résolues. Sa fabrication en série peut démarrer. Ainsi, le nombre total de diesels passe, entre juin 1901 et juin 1902, de 138 à 350. Soit une progression de 153 %. Elle reste cependant bien faible, comparée aux autres modes de production d'énergie. Ne serait-ce qu'en Allemagne, on comptait déjà, en 1895, 18 070 moteurs à combustion interne et 58 500 machines à vapeur !

En 1908, les brevets de Rudolf Diesel tombent dans le domaine public. La construction s'accélère. Les versions du moteur se multiplient : monocylindre, multicylindre (cylindres opposés, en ligne, en V). L'année suivante, le Français Sabathé met au point le cycle « mixte », dont l'application aux moteurs Diesel rapides sera plus tard un succès. Deux ans encore, et Sulzer réalise le premier diesel suralimenté.

LES CONTRAINTES DE POIDS

Les constructeurs ne ménagent pas leurs efforts pour diffuser l'engin. Ils lui font une large place dans leurs catalogues illustrés.

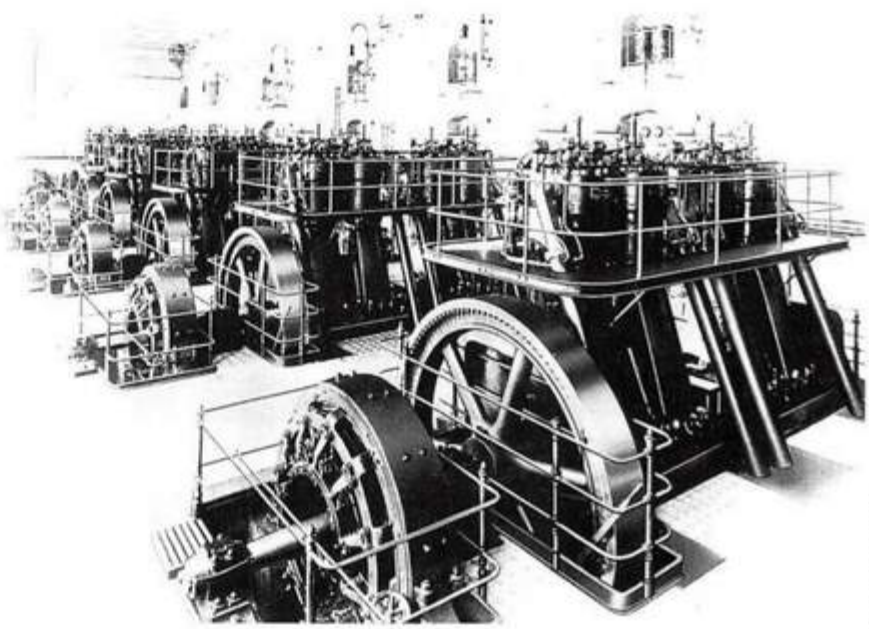
Mais durant la première décennie du XXe siècle, ses applications demeurent restreintes. Pourquoi ? Elles se heurtent à un premier obstacle : le poids de l'engin. Ce dernier limite son emploi. Seuls les gros moteurs de 300 ch (1902) à 1000 ch (1910), ou plus petits (25 à 150 ch) mais accouplés, trouvent un débouché entre les moteurs à gaz de faible puissance et les énormes machines à vapeur. Ils commencent par équiper deux domaines, les générateurs électriques et la Marine. Là, on recherche à la fois des grandes puissances et des faibles vitesses de rotation (pour une très grande longévité ou pour réaliser la commande directe des hélices). Entre 1903 et 1906, la centrale électrique des tramways de Kiev est la première à être équipée de moteurs Diesel. A la même époque, le constructeur français Sautter-Harlé inaugure la péniche *Petit-Pierre*, fonctionnant au diesel. La Marine militaire française s'intéresse également au nouveau moteur pour la propulsion de ses sous-marins (*L'Aigrette* en 1901, le sous-marin *Z* en 1903). Il supplante rapidement les machines à vapeur ou les moteurs à essence qui équipaient jusqu'alors ces bâtiments de guerre. En effet, la Marine s'accommodait mal d'un sous-marin indiscret (en raison des énormes cheminées qui évacuent la fumée des chaudières), lent à l'immersion (du fait de la complexité des manœuvres préalables) et peu sûr (explosions des chaudières, ou des réservoirs d'essence). Quelques années plus tard, le diesel remplace les machines à vapeur à bord des paquebots. Il s'y impose pour des raisons de sécurité, ainsi que pour son encombrement moindre que celui de la machine à vapeur. Seule contrainte : le ravitaillement en mazout, à une époque où les



I. DE SELVA - TAPABOR

Fondée à la fin du XIXe siècle, la firme italienne Fiat, avant de s'intéresser aux camions, se lance dans la construction de moteurs Diesel destinés à équiper les navires de petit tonnage.

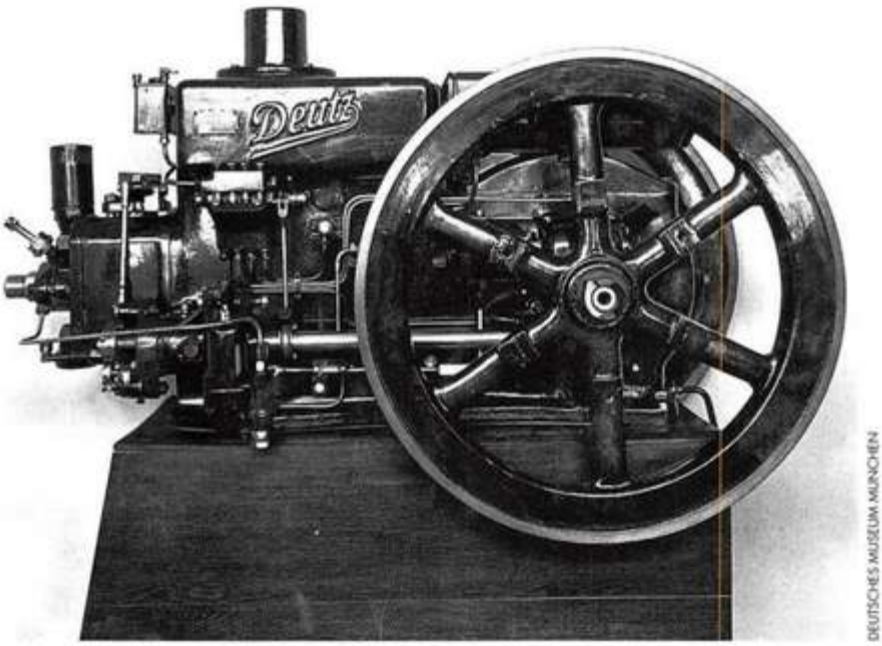
Entre 1903 et 1906, on installe à Kiev la première centrale électrique fonctionnant au diesel. Elle est équipée de six moteurs à 4 cylindres, 4 temps, tournant chacun à 160 tours/minute.



M.A.N WERKARCHIV

ports stockent surtout le charbon pour les nombreux bateaux à vapeur. Le coup d'envoi est donné avec le *Sealandia*, un paquebot danois qui relie l'Europe à l'Asie. Dès 1910, on songe à appliquer le diesel à la traction ferroviaire : la première locomotive diésélisée est construite par la société Klose-Sulzer, en 1912.

Peu à peu, le diesel élargit l'éventail de ses utilisations. Cette progression se fait au prix d'améliorations constantes. Elles permettent d'adapter le moteur à chaque nouveau secteur où les considérations de poids n'interviennent pas.



DEUTSCHES MUSEUM MÜNCHEN

Au lendemain de la Première Guerre mondiale, le moteur Diesel bénéficie de nombreuses améliorations : augmentation du régime, réduction de la taille ... A partir des années 20, les petits moteurs peuvent s'attaquer à l'industrie automobile.

Les contraintes du marché

Outre les limites d'utilisation imposées par ses dimensions, le diesel doit trouver sa place parmi les autres types de moteurs.

La plupart des petites et moyennes entreprises, équipées à la vapeur, attendent que leur matériel soit inadapté ou usé pour en changer. Un comportement renforcé dans les pays comme la Grande-Bretagne, où le coût du charbon est très bas.

D'autre part, les débuts de la diffusion du diesel coïncident avec ceux d'une autre source d'énergie : l'électricité. Les premiers grands générateurs sont installés dès la fin du XIXe siècle. Cette énergie connaît un développement rapide dans les régions industrielles traditionnelles d'Allemagne ou de France. On assiste, dans les pays scandinaves, à une multiplication de micro-centrales électriques (grâce aux nombreux torrents). De ce fait, l'électricité va devancer le diesel dans ces pays.

Quid des autres moteurs à combustion interne ? Les principaux modèles, dont certains possèdent des caractéristiques communes avec le diesel (les moteurs Ackroyd-Stuart), ont eu le temps de s'adapter au marché local, voire national. De fait, leurs constructeurs n'ont rien à gagner avec le nouveau moteur, dont les débuts n'ont pas laissé une impression favorable. On trouve parmi eux les Allemands Capitaine, Körting, Spiel, les Anglais Hornsbys, Ackroyd-Stuart, l'Américain Brayton, les Français Hiel, Levassor. En Suède, la maison Ründolf équipe, dès 1902, de nombreux bateaux de pêche et chantiers forestiers avec son moteur dérivé du type Ackroyd-Stuart. L'important marché scandinave échappera ainsi au diesel pour des dizaines d'années.

Le diesel emporte donc ses premiers marchés là où il n'y a pas de concurrents. C'est-à-dire dans la gamme des puissances supérieures à celles des moteurs à essence de l'époque, ou inférieures à celles des grands générateurs à vapeur (ceux de l'industrie lourde, des grands paquebots) ou électriques. Une telle orientation est renforcée par les constructeurs. A cette époque, seuls les industriels de la métallurgie lourde peuvent réaliser les pièces capables de supporter les hautes pressions du moteur Diesel. Cherchant à amortir leurs installations, ils fabriquent des engins de plus en plus puissants pour s'assurer le contrôle du marché, notamment celui de la Marine. Les relations étroites qu'entretiennent les grands métallurgistes avec les chantiers navals facilitent d'autant cette démarche.

Survient la Première Guerre mondiale. Elle va donner un nouvel élan au diesel. Pendant le conflit, celui-ci équipe de nombreux sous-marins et navires militaires. Mais ce sont surtout les besoins créés par la reconstitution des flottes militaires et civiles qui vont permettre à l'industrie du diesel de se développer à l'échelle mondiale.

La diésélisation de la route

Au lendemain des hostilités, le moteur Diesel connaît des améliorations notables. L'injection mécanique ouvre la voie aux moteurs à régime plus élevé. C'est aussi l'époque où la suralimentation, déjà mise en pratique par Sulzer en 1911, commence à être appliquée couramment. Enfin, les progrès de la métallurgie permettent désormais de fabriquer des pièces mécaniques moins lourdes et moins encombrantes, tout en restant très robustes.

UNE LENTE MONTÉE EN PUISSANCE

Un autre domaine, celui de l'automobile, prend également de l'ampleur. Il entraîne le développement de l'industrie du pétrole et la production de produits moins nobles (donc moins chers) que l'essence. Or, certains d'entre eux sont utilisables dans les diesels.

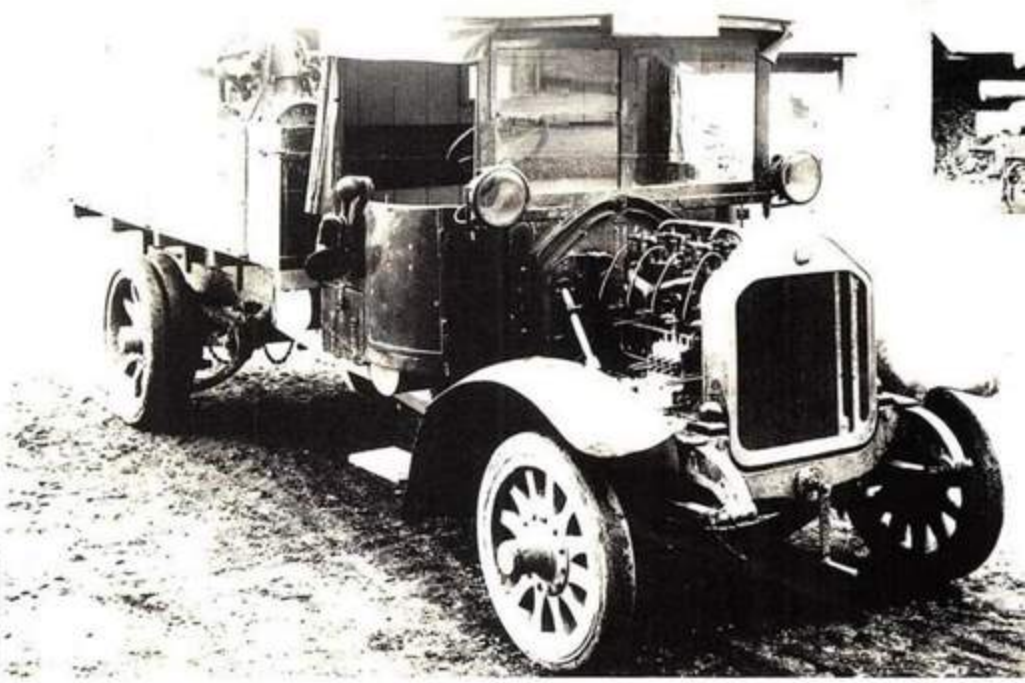
Plusieurs facteurs sont donc réunis pour qu'au tournant des années 1920, le diesel – sous forme de petit moteur d'une puissance de 80 à 100 ch – entre au service de l'industrie automobile. Une conquête que Diesel avait envisagée dès la commercialisation de son moteur.

Dans un premier temps, les constructeurs d'automobiles et de camions achètent les licences ou les procédés de fabrication aux spécialistes du diesel, industriel ou marin. A partir de là, ils conçoivent de nouveaux produits. Ceux-ci doivent regrouper deux qualités : une taille suffisamment petite et une puissance suffisamment élevée pour la traction automobile. En France, Renault et Panhard développent leurs propres technologies à partir des brevets français Sautter-Harlé. Les constructeurs Berliet, Bernard, Delahaye et Latil achètent des brevets aux Allemands M.A.N ou Deutz, ou encore au suisse Sulzer.

Deux stratégies commerciales s'offrent alors aux dirigeants des usines automobiles : diversifier leurs produits ou se positionner sur un marché précis, celui du camion ou de la petite voiture. Les constructeurs allemands Benz et M.A.N optent pour la spécialisation. En 1923, ils réalisent le premier camion fonctionnant avec un moteur Diesel. Ses avantages sur le moteur à essence : une moindre consommation de combustible ; un plus bas régime (pour la même puissance), qui facilite le démarrage de ces gros véhicules. En Allemagne, dix ans plus tard, 60 % des nouveaux camions de plus de deux tonnes sont équipés de moteurs Diesel. En Italie, la compagnie Fiat en dote des navires de petit tonnage. Mais, sous l'impulsion de Giovanni Agnelli, elle change rapidement de cap pour se lancer dans la construction des camions diesels. En France, le constructeur Berliet délaisse les voitures dans les années 1920 pour devenir le pionnier national du camion diesel. Les Usines Renault suivront la même voie, à partir de 1934. Outre-Manche, c'est l'usine Leyland qui commence à diéséliser les transports routiers, de même que Atkinson et Foden.

L'emploi du diesel facilite la naissance du camion lourd, de dix à vingt tonnes de charge. Jusque dans les années 1914, ce véhicule ne dépasse pas les 5 tonnes ; il ne transporte que des marchandises en vrac (charbon, produits agricoles...). Puis la Première Guerre mondiale consacre l'importance des véhicules terrestres : des camions plus lourds sont ainsi construits. D'autre part, les équipements domestiques, les produits manufacturés et agroalimentaires se développent. Or, il faut adapter les moyens de transport au conditionnement et au stockage de ces nouvelles marchandises. Le camion lourd répond à ces exigences.

A la même période se pose le problème des infrastructures : les routes sont mauvaises et leur réseau insuffisant. L'asphalte et le béton vont permettre d'améliorer la qualité de la chaussée. Et la construction des autoroutes va étendre considérablement le réseau routier. Si l'Allemagne est le pays le plus diésélisé des années 1930 (3/4 du parc utilitaire avant la guerre), elle constitue également la patrie des autoroutes (3000 kilomètres « d'autobahnen » voient le jour entre 1933 et 1939). En France, le développement du diesel dans le transport routier s'appuie sur la modernisation et l'élargissement des grandes « routes nationales ». Du fait de son régime lent, il gagne également les véhicules soumis à des arrêts fréquents, soit les autobus et les autocars. Ce mode de transport interville connaît un grand essor à la



M.A.N. WERKARCHIV

A l'Exposition automobile de Berlin, en 1924, les constructeurs M.A.N et Benz présentent le premier camion équipé d'un moteur Diesel.

fin des années 20. Il est assuré, dans la plupart des pays d'Europe (à l'exception de la Suisse et de certains Länder allemands) par des compagnies privées. Et certaines d'entre elles sont financièrement liées à des constructeurs de matériel, notamment d'autocars diesels. Cet élément aura une part non négligeable dans la diésélisation des transports collectifs routiers.

Le marché des petites voitures s'avère plus lent à conquérir. Les constructeurs ont du mal à obtenir un moteur équivalent (poids et encombrement) aux moteurs à explosion alors utilisés. Par ailleurs, on reproche au diesel un fonctionnement rude et bruyant, des problèmes d'injection et un trop faible nombre de stations-service adaptées.

Les premiers essais réussis datent de 1936. Daimler-Benz commercialise, cette année-là, la Mercedes 260D, première voiture équipée d'un moteur Diesel (4 cylindres, d'une puissance de 45 ch). A l'époque, des maisons comme Deutz et Hanomag en Allemagne, Peugeot en France, lui emboîtent le pas.

Il faudra cependant attendre les années 70 pour que le parc des voitures particulières soit largement diésélisé.

AUTORAILS ET PULLMANS

Dans tous les pays développés, le transport ferroviaire a le monopole du transport public, et ce jusqu'à la mutation des transports routiers, dans les années 30. Cette nouvelle concurrence fait chuter les bénéfices des compagnies ferroviaires, publiques et privées. Leur situation économique s'aggrave encore avec la grande crise de 1929. L'une de ses conséquences est d'abaisser le volume et les prix des frets. Dès lors, les compagnies n'ont d'autre solution que d'adapter leurs coûts d'exploitation et leurs coûts fixes (matériel et personnel) aux nouvelles donnes du marché.

La machine à vapeur domine encore le domaine ferroviaire. Mais les convois tractés par la vapeur sont particulièrement compliqués à exploiter (maintenance coûteuse, approvisionnement en charbon et en eau difficile, personnel important) sur les lignes secondaires ou les dessertes de marchandises à courte distance. Celles-ci exigeraient plutôt des convois courts, à rotation rapide.

Le moteur Diesel et l'électrification offrent une alternative intéressante pour moderniser les réseaux ferrés. Quel mode de traction choisir ? D'un côté, les locomotives électriques peuvent fournir, pendant un temps très court, une puissance bien supérieure à leur puissance de base. Ce qui leur confère une aptitude remarquable à la remorque des trains lourds, tant en démarrage qu'en rampe. L'électrification présente cependant un inconvénient de taille : son coût. D'autant plus qu'elle se justifie sur les grandes lignes, destinées à la fois aux lourds convois de marchandises et aux rames rapides de voyageurs. Or, la plupart des compagnies sont hors d'état de financer l'électrification d'un réseau trop étendu.

De l'autre côté, le diesel. Comparé à la vapeur, il offre un rendement bien supérieur, une grande autonomie de combustible, un entretien réduit. Comparé à l'électricité, il nécessite des investissements moindres. En contrepartie, sa puissance utilisable est strictement limitée. Il l'emportera tout de même sur l'électrification. Dans les années 1930, le diesel entre dans les transports ferroviaires par la grande porte, avec le développement des « autorails ». L'Allemagne est l'un des pays européens les plus prompts à diésélisier son réseau ferroviaire. Dès 1933, le *Fliegender Hamburger* (« Hambourgeois Volant », par référence au « Hollandais Volant » de la légende germanique) emmène le voyageur de Berlin à Hambourg en 2h 20 minutes. Cet autorail de deux voitures, équipé de moteurs Diesel de 410 ch, atteint des pointes de plus de 150 km/h. Comme son équivalent construit par la Franco-Belge pour le Paris-Lille et le Paris-Liège, il utilise une innovation testée pour la première fois en Angleterre, en 1928 : l'entraînement par le diesel de générateurs électriques.

A la veille de la Seconde Guerre mondiale, les rames diesels ne sont pas toutes aussi sophistiquées. La plupart des 600 autorails à huit et douze cylindres, construits par Renault pour équiper la toute récente SNCF, possèdent des moteurs directement accouplés sur l'essieu.

Le diesel ne règne cependant pas sans partage sur les autorails. Dans le même temps, on construit des autorails à turbines à gaz ou à essence (comme les « Michelines » de la SNCF à moteur Hispano, ou encore les autorails de la Compagnie PLM à moteur Bugatti).

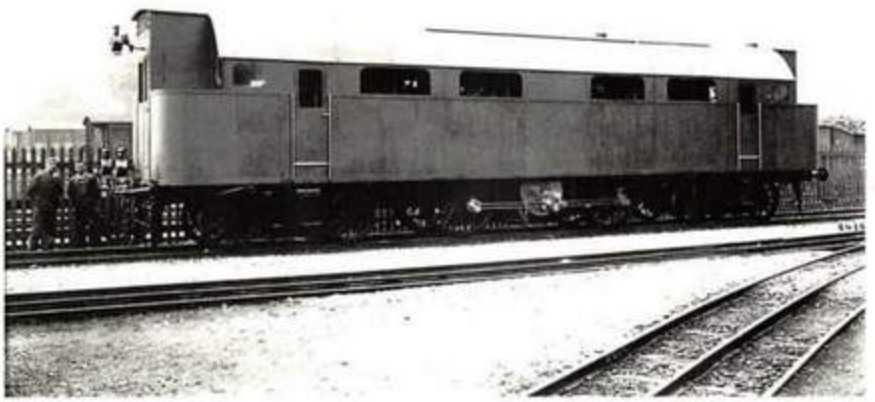
Outre-Atlantique, la diésélisation va entraîner une véritable révolution du trafic ferroviaire. Il est alors en plein marasme. Principaux responsables : le recul du fret lourd en vrac, et la concurrence de la circulation routière. Celle-ci connaît un exceptionnel développement, encore accéléré par le faible prix de l'essence et par la mise en place des autoroutes fédérales du *New deal*.

Plus qu'en Europe, la vapeur se heurte ici à ses limites économiques et techniques. Seul le diesel semble pouvoir s'imposer (l'électrification sur les énormes distances de ce pays est trop onéreuse). Ce qu'il fait à partir de 1934. C'est le début de toute une génération de moteurs de grande puissance (1800 ch), fabriqués par la General Motors. D'une part, ils tractent ces convois interminables et peu pressés qui sillonnent le continent. D'autre part, ils équipent les nouveaux trains rapides *interstate* et *intercity*. Entre 1936 et 1941, le nombre de trains diesels passe de 87 à 1369. Deux constructeurs de prestige se partagent ce nouveau domaine : Budd, avec ses rames en acier, et Pullman, qui l'emportera

UNE LENTE MONTÉE EN PUISSANCE

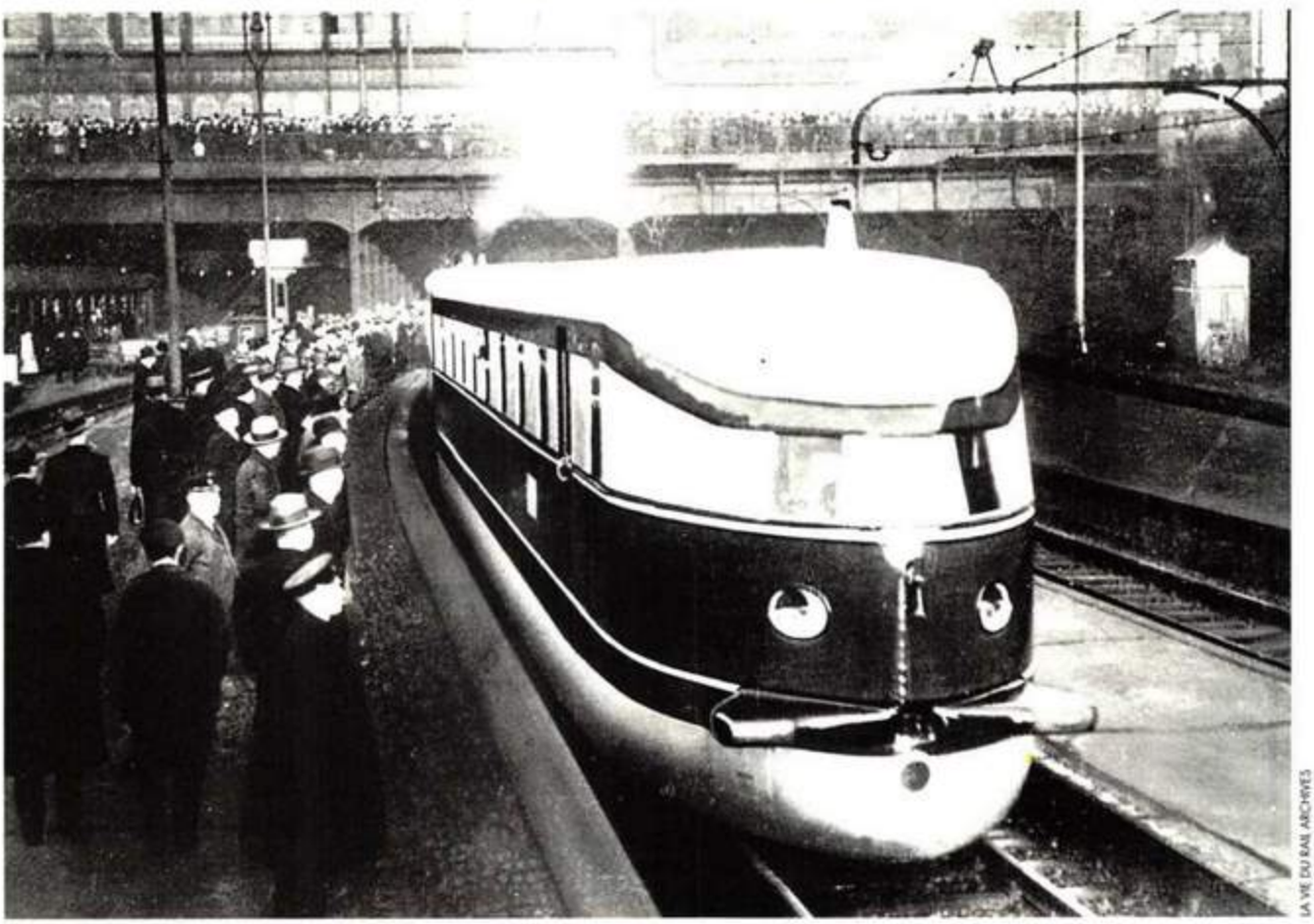
avec des rames en aluminium.

Il aura fallu au moteur Diesel près de quarante ans pour entrer dans la vie courante. Les années 1920 marquent une première grande étape : le diesel s'échappe du monde restreint des constructeurs de grosses machines pour gagner l'industrie automobile. A la veille de la Seconde Guerre mondiale, tous les éléments nécessaires à une diésélisation de masse sont en place. Un seul mode de transport continuera d'échapper au diesel : l'aviation. Ce n'est pourtant pas faute de tentatives. Des moteurs Diesel, fabriqués par l'Allemand Junkers, ont en effet été installés sur des bombardiers et des avions de transport de la Luftwaffe. Mais ils sont rapidement surclassés par les moteurs à essence à injection directe (Junkers), puis par les moteurs à réaction. ■



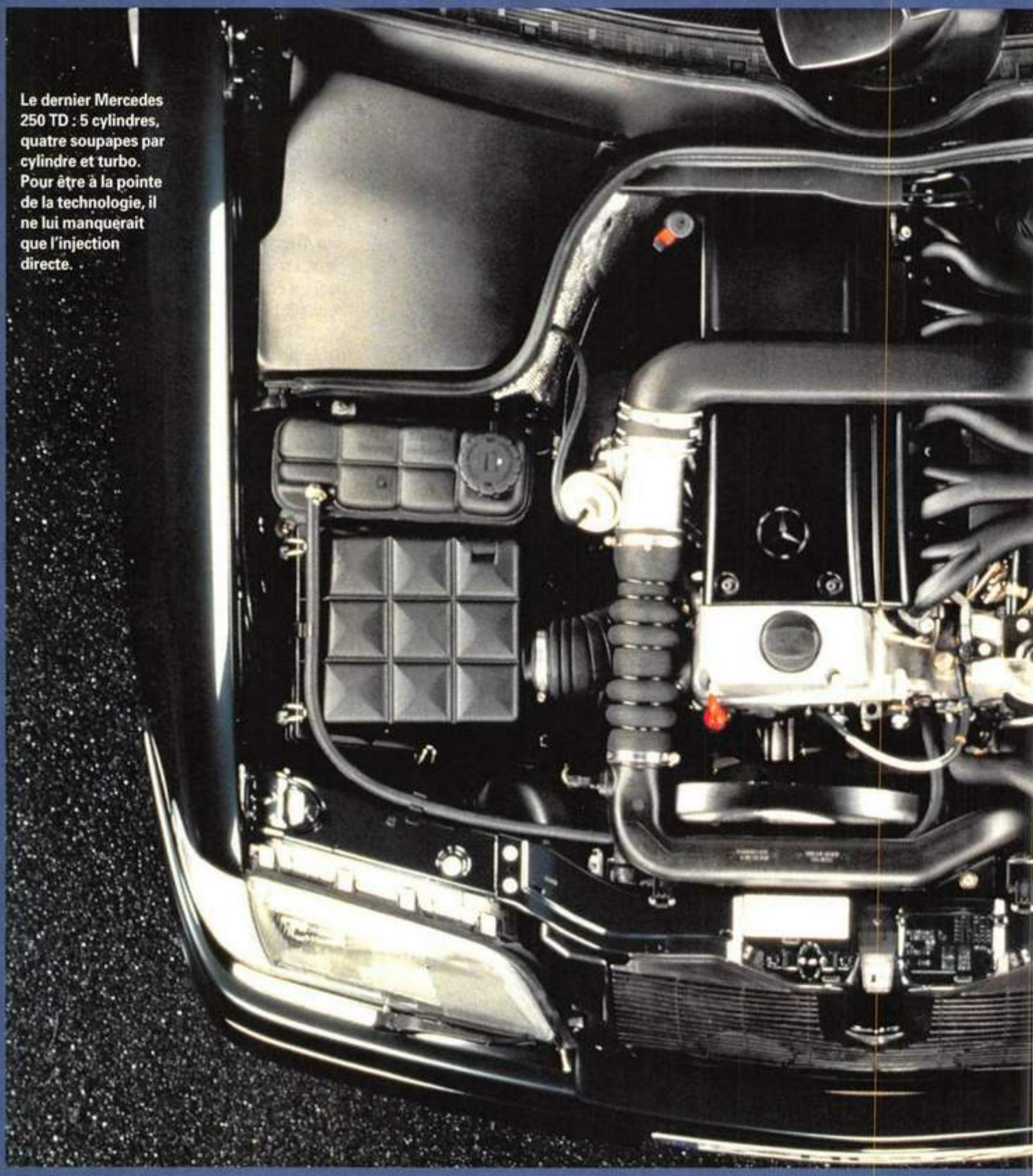
DEUTSCHES MUSEUM MÜNCHEN

Après la première locomotive mue par un diesel en 1912 (ci-dessus), le moteur s'impose dans les transports ferroviaires à partir des années 30. Le *Fliegender Hamburger* (ci-dessous), relie en 1933 Berlin à Hambourg, soit 286,8 km en 2 h20 mn.



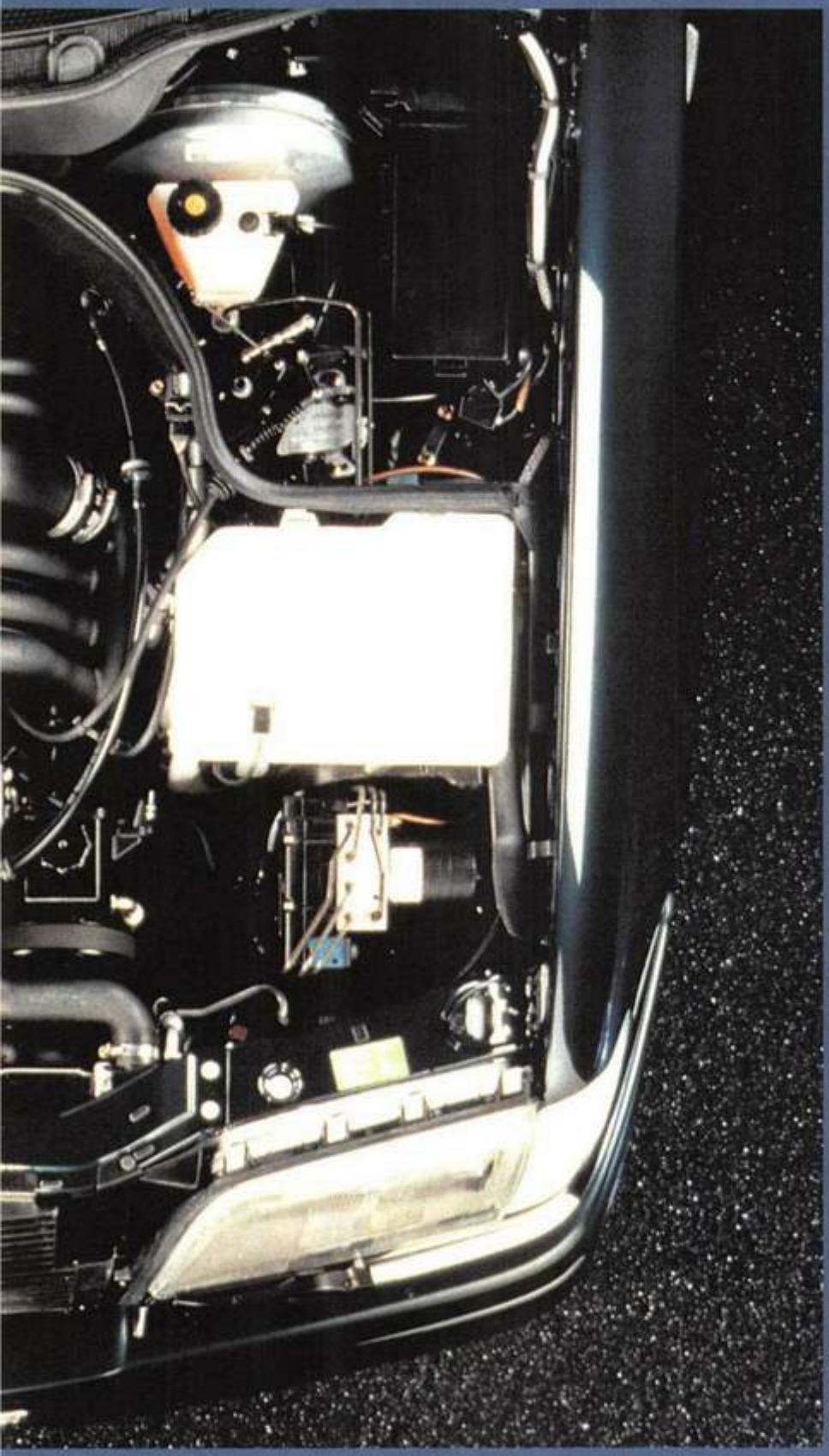
LA VIE DU RAIL ARCHIVES

Les temps moderne



Le dernier Mercedes 250 TD : 5 cylindres, quatre soupapes par cylindre et turbo. Pour être à la pointe de la technologie, il ne lui manquerait que l'injection directe.

s du moteur Diesel



MERCEDES-BENZ

Parlant de diesel aujourd'hui, nul ne songe plus à un inventeur, mais à un moteur d'automobiles. Léger, associé à un turbocompresseur, bientôt multisoupape, le moteur diesel est devenu puissant et silencieux. Peu gourmand, utilisant de surcroît un carburant fiscalement avantagé, il a la faveur des Français : une voiture neuve sur deux achetée dans l'Hexagone est une diesel. Reste un problème : pourra-t-il satisfaire à des normes de pollution de plus en plus sévères ?

PAR **Luc Augier**

Les temps modernes du moteur Diesel

Admission, compression, détente, échappement : le cycle à quatre temps du moteur diesel est exactement le même que celui de son homologue à essence. A une différence près : l'inflammation des gaz s'y fait sans bougie. Elle y est spontanée, se produisant sous le seul effet de leur élévation de température et de pression.

Le diesel exploite donc un phénomène – la détonation – que l'on cherche à tout prix à éviter dans un moteur à essence. Il en tire deux précieux avantages. Il utilise d'une part un carburant plus énergétique : par rapport à l'essence, le gazole contient 10 % d'énergie supplémentaire au litre. Il en fait d'autre part un meilleur usage. Le rendement du moteur est en effet directement lié à son taux de compression ; or, les gaz sont comprimés dans le rapport de 22 à 1 sur un diesel contre 10 à 1 en essence, soit plus du double.

Ce procédé séduisant présente pourtant un important inconvénient : sa difficulté de mise en œuvre. La détonation doit en effet se produire à l'instant opportun du cycle : quand le piston a atteint son point mort haut, et là seulement.

Dans un moteur à allumage commandé (bougie), l'essence est aspirée et comprimée avec l'air. Le mélange comburant-carburant est effectué durant deux temps du cycle – l'admission et la compression – sur un tour de vilebrequin. A 2000 tours/minute, l'opération s'étale sur 30 millisecondes. Avant d'être enflammé par l'étincelle de la bougie, le mélange gazeux peut donc être longuement brassé et affiné. Un Diesel, au contraire, n'aspire et ne comprime que de l'air. Le gazole n'est injecté dans cet air porté à 500 ou 600°C et 50 bars (le double dans le cas d'un moteur suralimenté) qu'au moment précis où le piston a atteint le point mort haut. Pour que l'inflammation soit la plus efficace possible, l'injection doit donc se faire très rapidement, avant que le piston soit trop avancé dans sa course descendante. Au bilan, l'opération de mélange comburant-carburant ne s'étale plus que sur quelque 10° de tour de vilebrequin. A 2000 tours/minute, cela représente moins d'une milliseconde, un temps 36 fois plus court que pour un moteur à essence. De telles conditions rendent difficile l'obtention d'un mélange homogène, et par suite, l'optimisation de la combustion et du rendement.

Comment y parvenir ? Deux solutions techniques existent qui, l'une et l'autre, consistent à améliorer la diffusion du gazole en faisant tourbillonner l'air dans lequel il est pulvérisé.

Dans la première solution, l'injection indirecte de Ricardo, on crée des tourbillons dans cet air une fois qu'il est admis et emprisonné. La remontée du piston le force dans une chapelle annexe, la préchambre, où le gazole est injecté. L'air y pénètre à une vitesse de 100 km/h et en ressort, sous l'effet de la dilatation, à une vitesse de 250 km/h et à 2100°C. Le processus de combustion ainsi amorcé se poursuit dans la chambre principale.

Dans la deuxième solution, l'injection directe, l'air est mis en rotation lors de son aspiration par le piston. On l'a en effet forcé à circuler dans un conduit d'admission en colimaçon qui crée la turbulence souhaitée. Le gazole est alors injecté dans la chambre principale, où se produit la détonation.

Dans l'un et l'autre cas, on entrave ainsi inéluctablement la circulation des gaz, on complique leur transvasement, on concède des « pertes de charge » alors que le moteur est censé fonctionner comme une pompe aspirante et refoulante, au maximum de sa capacité. L'avantage théorique initial est sensiblement dégradé.

Une autre différence fondamentale intervient entre essence et diesel. Dans le premier cas, l'appel de puissance, par pression sur l'accélérateur, entraîne l'ouverture d'un papillon libérant le passage des gaz dans le conduit d'admission. Dans le second, ledit conduit est libre, il n'y a pas de papillon, le moteur fait toujours son « plein » d'air et l'accélérateur commande le dosage de l'injection de gazole. Un moteur à essence fonctionne donc à richesse constante, tandis qu'un diesel fonctionne à richesse variable, en fait le plus souvent en excédent d'air et donc en mélange pauvre (richesse de 0,2 à 0,75 au lieu de 1).

Une autre différence concerne la physique de la combustion. Dans le moteur à essence, elle se fait, à la manière d'un lance-flammes, par propagation d'un front de flammes. Dans

L'injection directe chez Audi : un conduit en colimaçon assure la turbulence de l'air admis. Le brassage est activé par la forme conique du fond de piston et la division du jet de l'injecteur.

AUDI - VOLKSWAGEN

le Diesel, la combustion s'effectue, plutôt comme dans un champ de mines, par une succession d'explosions, d'où le niveau sonore et les vibrations plus élevés. Ces phénomènes sont amplifiés dans le cas de l'injection directe, où la combustion est encore plus immédiate et brutale.

Il résulte de ces deux cahiers des charges des structures, des morphologies et des techniques spécifiques.

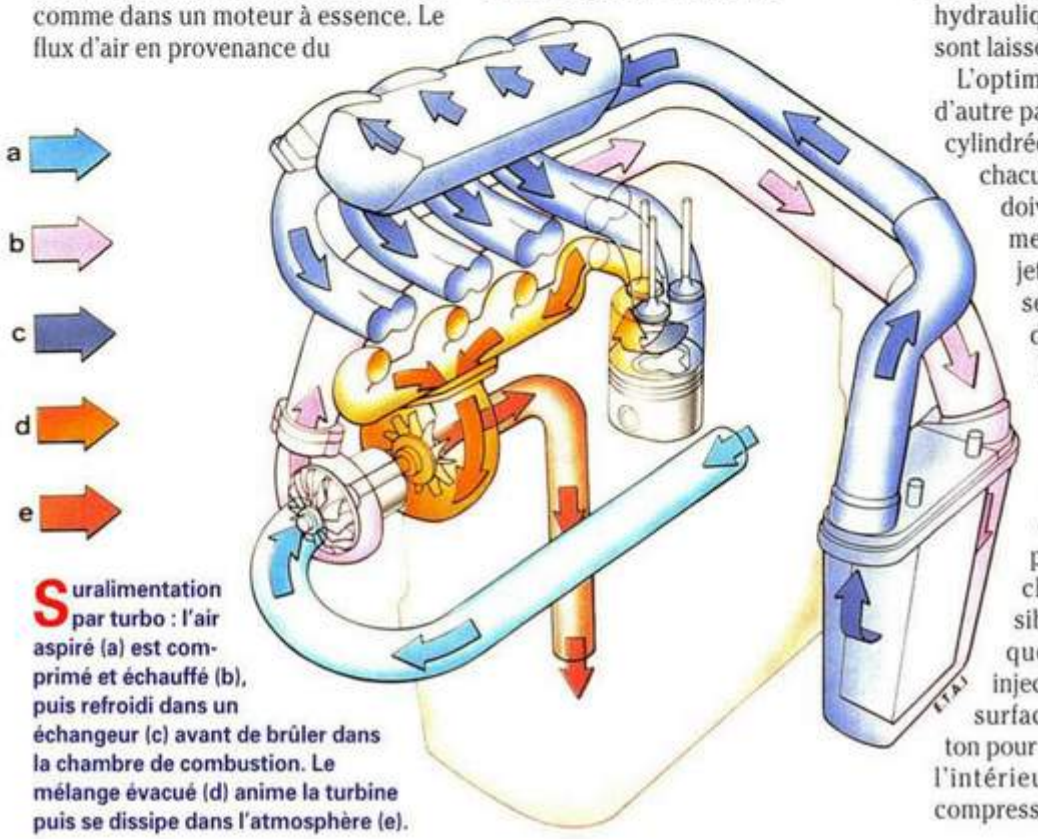
A énergie développée égale, la cylindrée du moteur diesel est fatalement plus élevée que celle du moteur à essence. Nous verrons pourquoi dans la suite. De plus, le moteur à injection directe, par son handicap de respiration dû au conduit en colimaçon, ne peut se concevoir qu'en version suralimentée : il faut le gaver. En version atmosphérique, son très mauvais remplissage le rendrait anémique. Par chance, le turbo se prête idéalement au diesel. L'aspiration de l'air étant toujours libre, le débit du compresseur ne bute jamais sur un conduit fermé, comme dans un moteur à essence. Le flux d'air en provenance du compresseur n'est donc pas freiné, même au ralenti, ce qui réduit son délai de remise en mouvement, son « temps de réponse ».

Plus gros, le diesel supporte aussi des pressions supérieures. Carters, pistons, bielles et vilebrequin doivent donc être renforcés, ce qui se paye en inertie et en poids. Ces pressions élevées augmentent de surcroît les déperditions par frottements : elles croissent avec le carré de la vitesse de rotation. Par chance, il n'y a aucun intérêt à rechercher les hautes vitesses de rotation pour un diesel : plus il tourne vite, plus la combustion s'étale sur la course descendante du piston et moins elle est efficace. Le rendement chute de manière conséquente à l'approche de 5000 t/m. La puissance est un produit mathématique du couple par le régime. A puissance égale, mais développée à un régime inférieur, le diesel sera donc plus prodigue en couple qu'un moteur à essence capable de tourner à plus de 7 000 t/m.

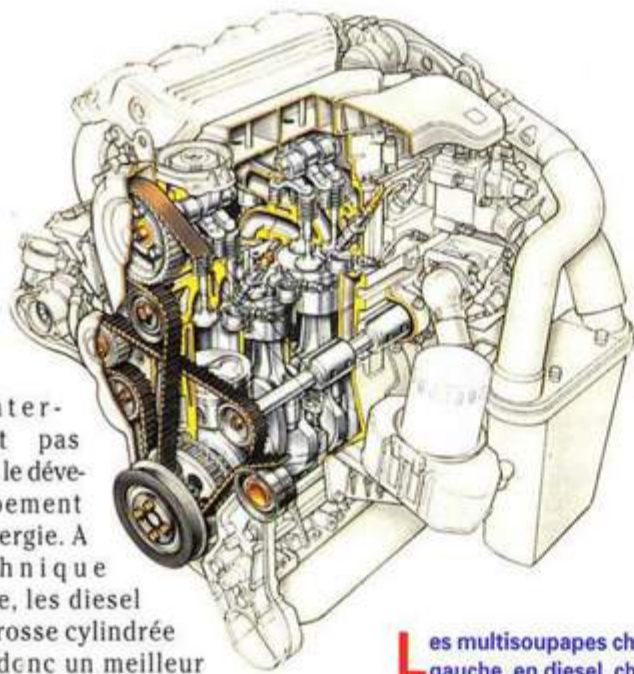
Côté alimentation, dans un moteur à essence, l'injecteur débite le carburant dans la colonne d'air admis à une pression très faible, de l'ordre de 3 bars. Dans un moteur Diesel, il faut déjà vaincre la pression régnant dans la chambre en fin de compression, donc franchir un seuil de 130 à 150 bars avant d'espérer y pénétrer ; puis, au-delà, injecter la quantité de gazole nécessaire en un temps très court, et, au fur et à mesure que le régime s'élève, une quantité plus grande en un temps encore plus court. On atteint ainsi des pressions d'injection de 350 bars (maxi) en injection indirecte et 300 à 800 bars en injection directe : de quoi facilement percer un pouce s'il était exposé au jet de gazole !

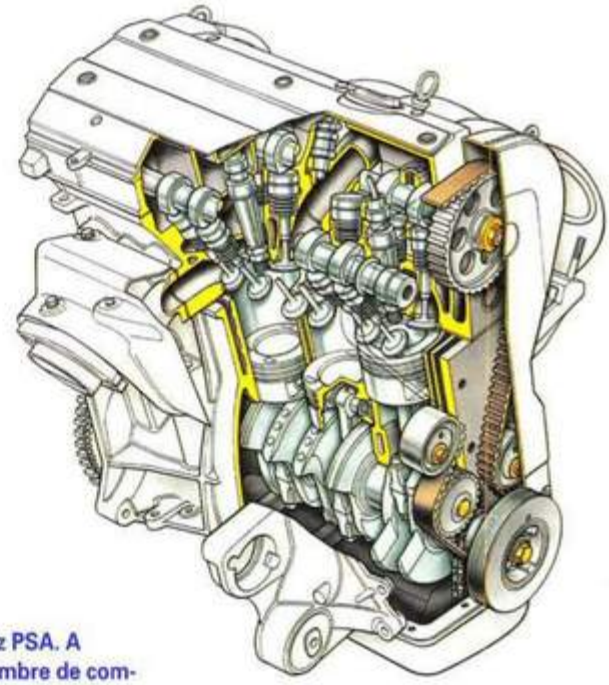
De tels niveaux de pression ne peuvent être obtenus par de simples électroaimants, comme c'est le cas avec l'injection tout électronique des moteurs à essence. Dans un moteur diesel, il faut avoir recours à des pompes haute pression mécanique ou hydraulique et seules les corrections sont laissées à l'électronique.

L'optimisation d'un diesel conduit, d'autre part, à définir différemment la cylindrée unitaire, les dimensions de chacun des cylindres. Les volumes doivent d'une part être suffisamment importants pour que les jets de gazole puissent se diffuser au mieux dans la chambre de combustion, sans heurter les parois et s'y perdre en ruissellements. Pour assurer un bon rapport volumétrique, il faut en outre éviter au maximum les « volumes morts inutiles », ne pas multiplier dans la chambre les recoins inaccessibles à la combustion. On sait que, s'agissant d'un moteur à injection directe, seule compte la surface du bol creusé dans le piston pour activer les tourbillons d'air à l'intérieur de la chambre lors de la compression. La surface périphérique



Suralimentation par turbo : l'air aspiré (a) est comprimé et échauffé (b), puis refroidi dans un échangeur (c) avant de brûler dans la chambre de combustion. Le mélange évacué (d) anime la turbine puis se dissipe dans l'atmosphère (e).





Les multisoupapes chez PSA. A gauche, en diesel, chambre de combustion plate, trois soupapes alignées, un seul arbre à cames, préchambre avec injecteur sur le côté. A droite, en essence, chambre de combustion hémisphérique, quatre soupapes inclinées par paires, bougie au centre et deux arbres à cames.

PSA

n'intervient pas dans le développement d'énergie. A technique égale, les diesel de grosse cylindrée ont donc un meilleur rendement que les petits.

Technique de pointe en essence, le recours aux multisoupapes est également indiqué en diesel. Elles améliorent en effet le remplissage, car elles permettent de faire rentrer plus d'air dans la chambre de combustion. D'où l'apparition des trois soupapes (deux à l'admission et une à l'échappement) par cylindre chez PSA et Renault, de quatre soupapes chez Mercedes. Il s'agit d'une prouesse d'architecture. En effet, pour un même alésage (la même surface de piston), la place est beaucoup plus comptée qu'en essence. La difficulté se renforce du fait que le diesel se prête plutôt aux longues courses. La surface supérieure de la chambre est plate, pour assurer un bon rapport volumétrique, et les soupapes sont donc en ligne. Les conduits d'admission sont ainsi beaucoup plus rapprochés dans la culasse, où il faut par ailleurs ménager la place du canal de transfert avec la préchambre dans le cas de l'injection indirecte, de l'injecteur s'il s'agit d'injection directe. S'ajoute à cela l'emplacement nécessaire à un circuit de refroidissement généreux, étant donné les calories à évacuer, ce qui implique des radiateurs plus volumineux pénalisant l'aérodynamique de la voiture.

Il n'empêche : à service égal, le diesel, malgré les difficultés de sa mise en œuvre, consomme quelque 20 % de moins que son homologue à essence, et moins encore en cycle urbain. Le gain est surtout significatif à faible ou moyenne charge, lors des phases transitoires (accélérations) et en fonctionnement à froid : le moteur diesel se dispense d'enrichissement et atteint beaucoup plus vite sa température de croisière. En revanche, l'écart est beaucoup moins spectaculaire à forte charge, sur autoroute par exemple.

Côté pollution, le diesel satisfaisait jusqu'ici aisément aux exigences requises, les mêmes que pour le moteur à essence, et cela sans recourir à un arsenal technique de retraitement des gaz émis. Il n'émettait pas plus de 2,72 g/km de CO, de 0,97 g/km de HC + NOx (il y a corrélation entre les émissions d'hydrocarbures imbrûlés et d'oxydes d'azote et on mesure leur somme) et de 0,14 g/km de particules sur un cycle de fonctionnement normalisé. Il aborde cependant de nouvelles échéances.

Dès le 1er janvier 1997, les voitures neuves ne devront pas émettre plus de 1g/km de CO (essence : 2,2g), 0,7 g/km de HC + NOx (essence : 0,5g) et 0,08 g/km de particules. La réglementation est déjà en vigueur sur les nouveaux modèles 96. Ces contraintes sont toutefois adoucies pour les diesel à injection directe : on admettra 0,9 g/km de HC + NOx et 0,10 g/km de particules jusqu'au 1er octobre 1999. La combustion plus brutale du diesel à injection directe rend en effet le problème plus ardu à résoudre mais son avantage en consommation, donc en émissions de gaz carbonique, incite à la tolérance. Il serait, dans ces conditions, dommage de lui opposer un challenge impossible au risque de le rendre hors la loi.

Ces contraintes impliquent des aménagements spécifiques. Par sa combustion et son élévation de température très brutales, le diesel forme quasi instantanément des suies, dont la plus grande partie est oxydée dans la suite du processus de combustion. Il n'en ressort que le millième à l'échappement sous forme de particules. Ces particules, de la dimension du dixième de micron, sont constituées d'un amalgame de petites sphères de 100 à 400 Angströms de diamètre. Malheureusement, leur structure en éponge a pour effet de fixer tous les autres résidus de combustion : les sulfates formés par le soufre contenu dans le gazole, les hydrocarbures imbrûlés provenant du gazole lui-même ou du lubrifiant. Or, ce sont tous ces fragments solides, sans

distinction des produits qui les constituent, qui sont pesés lors des opérations de contrôle alors que seul leur squelette de carbone est mutagène et donc nocif.

Pour satisfaire aux normes imposées, il faut donc éliminer tous les hydrocarbures imbrûlés qui risquent de fausser l'appréciation. Côté carburant, c'est possible par un meilleur contrôle de l'injection. Côté lubrifiant, il faut éliminer tout risque de remontée de vapeurs d'huile en provenance du carter. Il faut aussi éliminer toute trace de soufre dans les gazoles. La législation européenne en a fixé la teneur maximale à 0,05 %. Pour abaisser les émissions de particules, il suffit donc dans l'immédiat de disposer un catalyseur léger d'oxydation sur le circuit d'échappement. Au-delà, si, comme il en est question pour l'horizon 2000, le seuil devait être abaissé à 0,04 g/km, il faudrait s'assurer de la fiabilité des systèmes de mesure, tant on joue sur des quantités infimes. La solution ne pourrait passer que par un filtre amassant les émissions à faible charge en espérant les brûler à forte charge. Un tel dispositif n'est toujours pas au point : si les dépôts ne sont pas régulièrement brûlés tous les 200 kilomètres, ils risquent de provoquer un effet de torche qui détruirait le filtre en le faisant fondre. Ces dépôts créent en outre une retenue à l'échappement préjudiciable aux performances et au rendement.

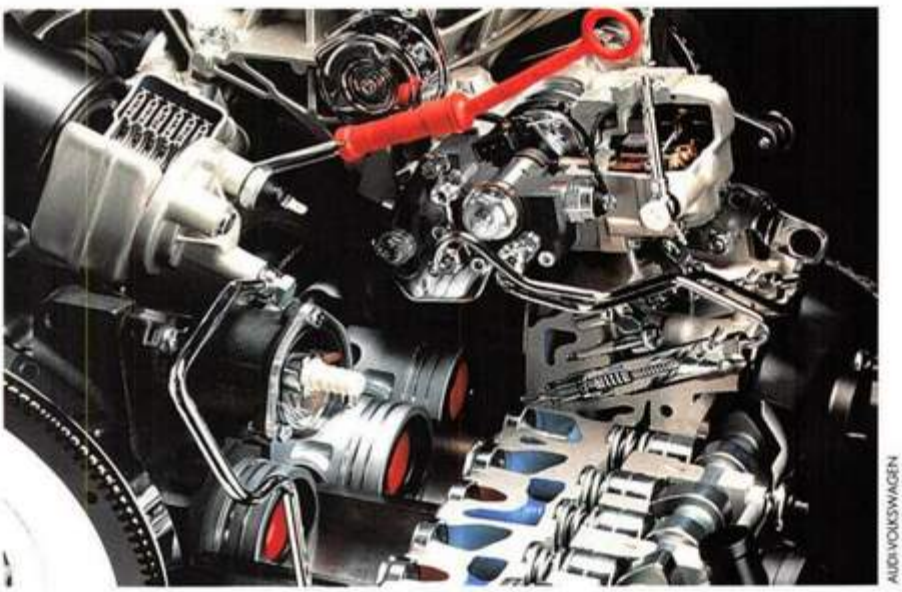
L'autre point critique concerne les oxydes d'azote. L'excès d'oxygène dû au fonctionnement en mélange pauvre et les hautes températures de combustion favorisent leur formation. Il faut donc retirer de l'oxygène au stade de l'admission, et ce d'autant plus que le moteur fonctionne à faible charge, donc en mélange d'autant plus pauvre. Pour cela, on réadmet une partie des gaz d'échappement, réadmission dosée en fonction des besoins. Ces gaz d'échappement sont constitués pour l'essentiel de gaz carbonique et d'eau, deux composés stables rejetés tels quels ou en partie dissociés, mais cette dissociation absorbe de la chaleur, abaisse donc la température, et combat à son tour la formation d'oxydes d'azote.

La mesure reste cependant insuffisante en injection directe, malgré la tolérance particulière accordée à ces moteurs, en raison des températures encore plus élevées dues à une combustion encore plus brutale. La réabsorption des gaz d'échappement doit être plus finement dosée, l'injection doit être assistée par électronique et les injecteurs doivent opérer progressivement, en deux étapes, pour étaler l'injection dans le temps, au détriment du rendement et donc de la consommation. Ces injecteurs à deux étages sont des bijoux de robustesse et de précision.

Cette technique plus raffinée va accroître l'écart de prix de revient industriel entre moteur essence et moteur diesel. Mais, contrairement au moteur à essence, la dépollution accrue des Diesel ne se traduira pas par une augmentation de leur consommation, sauf dans le cas de l'injection directe. L'avantage en émissions de CO_2 demeurera donc intact.

Ces efforts resteraient toutefois vains sans le concours des pétroliers. Car, plus encore qu'en essence, c'est ici le couple moteur-carburant qui doit progresser en phase : une moindre consommation et une moindre pollution impliquent un bon niveau de l'indice de cétane (50 au lieu de 48) favorisant la détonation, sans pour autant faire du gazole un produit trop sophistiqué. A cet égard, un gazole de distillation directe sera toujours meilleur – et moins cher – qu'un gazole issu du *cracking* de fractions pétrolières lourdes. Et au cas où les besoins devraient mal s'accommoder des disponibilités, on évoque la possibilité de réserver les meilleurs gazoles aux stations de distribution des sites urbains, les plus exposés à la pollution.

Côté motoristes, on peut encore attendre des progrès dans les dessins de chambres et de préchambres, avec le concours de nouveaux moyens d'études, d'investigation et de calculs des processus de combustion ; une connaissance toujours améliorée d'un principe qui n'a pas historiquement mobilisé les ingénieurs autant que le



AUDI/VOLKSWAGEN

L'injection directe (Audi) : une prouesse de la métallurgie et de la mécanique au bénéfice d'une consommation minimale.

Le diesel en chiffres

1

EUROSUPER	G-B	FRANCE	ALLEMAGNE	ESPAGNE	LUXEMBOURG	ITALIE	BELGIQUE	PORTUGAL	AUTRICHE	PAYS-BAS
HT	94	109	123	136	138	143	143	145	182	150
TTC	388	566	529	425	417	535	536	503	553	581
GAZOLE										
HT	97	106	121	117	123	126	136	123	174	139
TTC	391	388	384	329	338	422	400	342	443	409
ECART TTC		31,5 %	27,5 %	22,5 %	19 %	21 %	25,4 %	32 %	20 %	29,5 %
Ventes de voitures neuves*	415 470	939 952	532 885	250 191	8 170	151 237	164 364	27 019	109 227	52 094
% Diesel	21,7 %	47,6 %	16,6 %	27,5 %	28,1 %	9,1 %	42,4 %	11,6 %	39,9 %	12 %

* Données 1994

PRODUCTION EUROPÉENNE

PAYS	ESSENCE	DIESEL
Allemagne	3 174 121	919 564
Belgique *	921 674	280 357
Espagne	1 538 359	283 337
France	2 061 624	1 113 547
Italie	1 196 139	144 724
Grande-Bretagne	1 169 463	297 360

* Ford - Opel - Renault

2

Sur un parc français de 24,6 millions de voitures, on recense 6,3 millions (25 %) de diesels. Elles parcourent en moyenne 21 000 km par an en consommant 6,7 l/100 km, contre 12000 km par an et 8,5l/100 km pour la moyenne des voitures à essence. Depuis ces trois dernières années, le taux progresse avec des ventes annuelles de voitures neuves constituées pour 47,6 % (chiffres 1994) de diesels pour une moyenne européenne de 23 %. Les ventes de diesels dans l'Hexagone atteignent même 70 % dans les catégories de voitures moyennes et supérieures. Pour les véhicules utilitaires, la pénétration du diesel est encore plus forte : 80 % jusqu'à 2,5 tonnes, 85 % jusqu'à 3,5 tonnes.

La part des immatriculations de diesels en Europe (tableau 1) est, entre autres facteurs, liée à la fiscalité sur les carburants : c'est en France qu'elle est la plus forte, aboutissant à un volume presque deux fois supérieur à celui de l'Allemagne ! Sur la scène européenne, la France apparaît comme le plus gros producteur de modèles diesels (tableau 2).

PRODUCTION FRANÇAISE

MARQUE	DIESEL	TOTAL	% DIESEL
CITROEN	327 476	698 345	46,9 %
PEUGEOT	461 148	1 072 382	43 %
PSA	788 624	1 770 727	44,5 %
RENAULT	324 368	1 394 845	23,25 %
TOTAL	1 112 992	3 165 572	35,16 %

3

Le pari de PSA, la prudence de Renault : Peugeot et Citroën ont joué à fond la carte diesel (tableau 3): ils produisent trois fois plus de diesels que leur concurrent européen le plus proche, le groupe VAG, et le taux de diesels, dans leur production est pratiquement deux fois supérieur à celui de Renault. Ce choix, et les investissements qu'il implique, tient du pari. Pour l'heure, il est gagnant : en Europe (tableau 4), PSA a une part de marché très élevée en diesels, ce qui est moins le cas pour Renault. En France, le surcroît de pénétration de PSA compense la modération de Renault.

EXPORTATIONS FRANÇAISES

	Part de prod. exportée	Part de marché Europe	Part de prod. diesel exportée	Part de marché diesel Europe
Citroën	63,5 %	5,1 %	55,9 %	11,8 %
Peugeot	65, 4 %	7,7%	58 %	16,7 %
Renault	58,9 %	11 %	26,9 %	11,7 %
Total	62 %	23,8%	48,36 %	40,2 %

4

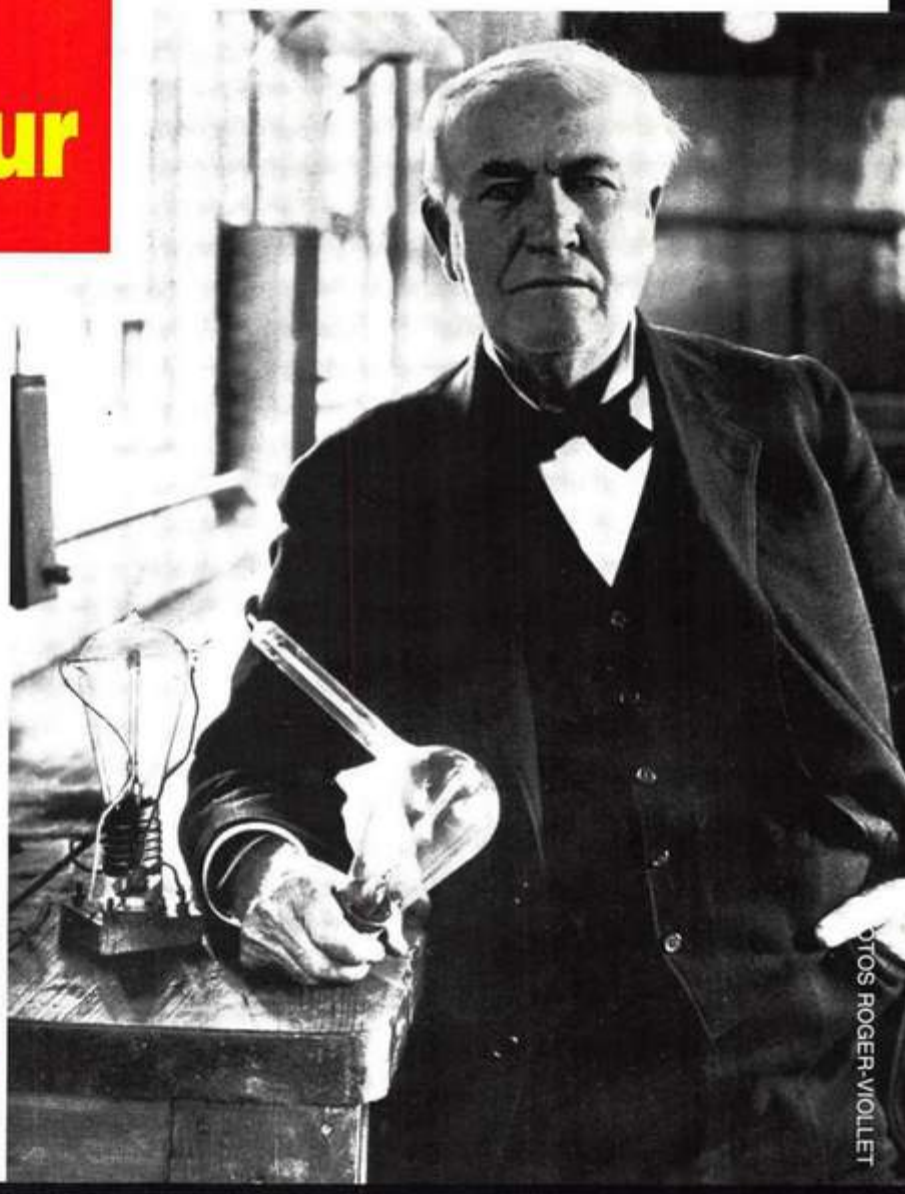
moteur à essence. Pour des raisons tenant à une fiscalité particulièrement favorable, le diesel passait pour une spécialité française mais il est aussi l'objet de la sollicitude des bureaux d'études allemands. Mercedes, BMW et VW ont signé un accord avec les pouvoirs publics d'outre-Rhin pour s'engager dans la course au diesel consommant moins de 3l/100 km à l'horizon 2000 ; 40 % des budgets de recherche et développement de VW lui sont consacrés.

Reste que son avenir est suspendu au discernement du législateur. Aux USA, il l'a « tué ». La clientèle n'en a cure mais il pourrait revenir en cour au nom de la limitation des émissions de CO_2. Au Japon, il se limite aux petits 4x4. Cette incertitude ne fait pas l'affaire des constructeurs. Ils sont obligés de surinvestir pour parer aux deux éventualités : un engouement déraisonnable à la française (45 % du parc neuf) ou une part de marché logique de 25 à 30 %. Or, l'appareil industriel n'est pas aussi flexible pour des lignes de moteurs bien spécifiques que pour des variantes de carrosseries. L'investissement est autrement plus lourd et contraignant. Face à la démission des Japonais et des Américains, tout en accordant considération à la compétence de Ford et GM, il y a pourtant là matière à donner un atout à l'Europe, à lui assurer un rôle de leader comme celui dont elle s'est prévalu, grâce au diesel aussi, dans le domaine des poids lourds. ■

Grands ingénieurs

NOUVELLE COLLECTION 1996

EDISON
Le mythe de l'inventeur



Edison fonda en 1876 le premier des laboratoires industriels, le Menlo Park où, entouré de physiciens, de chimistes et d'électriciens, il réalisa de nombreuses inventions : télégraphe automatique, téléphone à courant électrique, phonographe, compteur de courant, lampe électrique... Il est également à l'origine du premier réseau d'éclairage électrique à New York. En tout, il déposa plus d'un millier de brevets ! Les CAHIERS DE SCIENCE & VIE vous propose de découvrir cet ingénieur, figure de proue de la science américaine que l'on surnomma familièrement le «sorcier de Menlo Park».

LES CAHIERS DE SCIENCE & VIE

DES HISTOIRES RICHES EN DECOUVERTES

PARUTION LE 17 AVRIL 1996

Pourquoi les couleurs nous en mettent plein les yeux.

Ce **HORS SÉRIE DE SCIENCE & VIE JUNIOR** vous invite à entrer dans un monde de couleurs et de contrastes... Mais qu'est-ce que la couleur et où la trouve-t-on ? Dans la lumière ? Dans les objets ? Dans le cerveau ? Ces questions ont toujours intrigué les hommes et ce numéro apporte des réponses précises et concrètes.

SCIENCE & VIE JUNIOR HORS SÉRIE va vraiment vous en mettre plein la vue.

SCIENCE & VIE JUNIOR
DOSSIER HORS SERIE

EN VENTE PARTOUT

PHOTO PICTOR